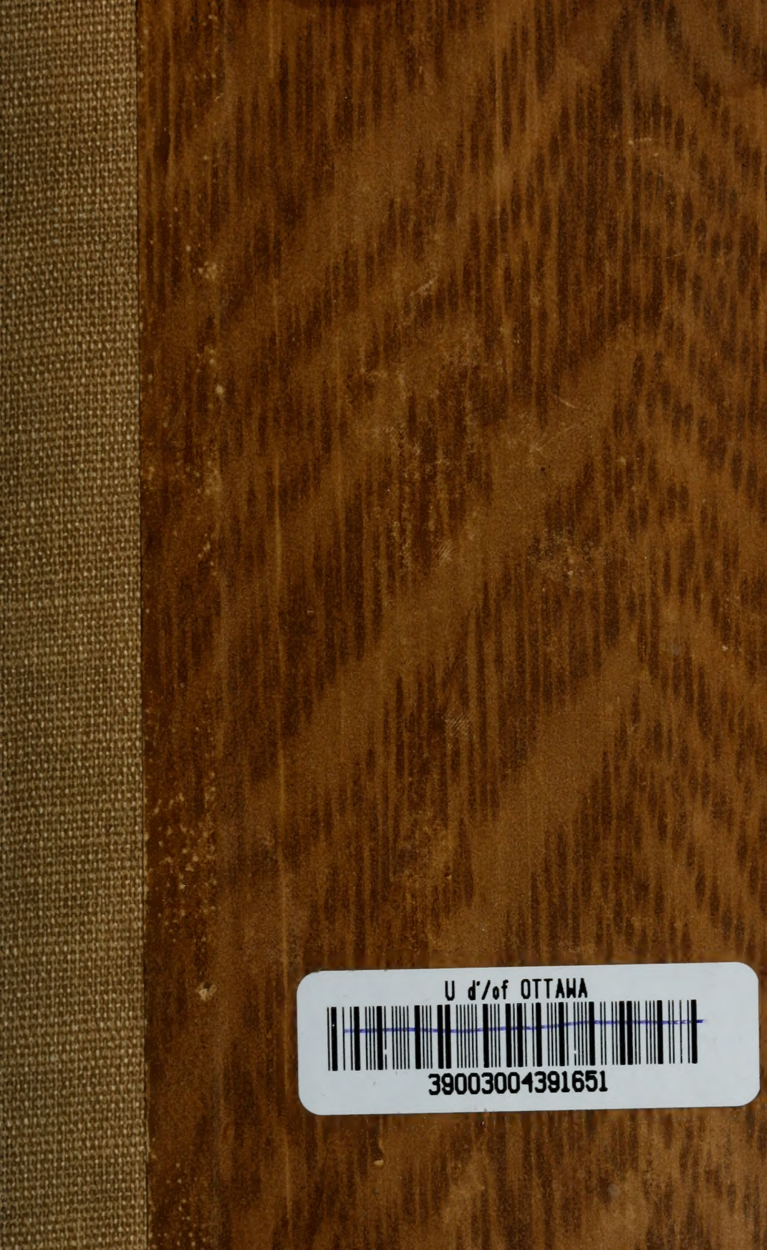

U d'/of OTTAWA
39003004391651

La Matière

Sa Vie et ses Transformations.

LOUIS HOULLEVIGUE
Professeur à l'Université d'Aix-Marseille.

La Matière

Sa Vie et ses Transformations

L'ULTRAMICROSCOPIE. — LE MOUVEMENT BROWNIEN
L'ÉTAT COLLOÏDAL ET LA VIE. — LES CRISTAUX LIQUIDES
LE RADIUM. — LES TERRES RARES. — LES GAZ CACHÉS
LE CYCLE DE L'AZOTE. — LA CATALYSE
LES EXPLOSIFS. — LE FROID CONSERVATEUR
L'ALIMENT CHIMIQUE

Préface de Ed. BOUTY, de l'Académie des Sciences.



Librairie Armand Colin
Rue de Mézières, 5, PARIS

1913

PRÉFACE

En dépit de l'étymologie, rien n'est moins vulgaire, rien n'est même plus rare qu'un bon vulgarisateur. S'il est aisé de paraître s'extasier sur des applications de la Science devenues banales, pour se répandre ensuite en explications diffuses et parfois naïves, il est malheureusement très difficile de demeurer exact et précis en se privant du secours habituel de l'analyse mathématique, et d'exprimer dans une langue souple et sobre ce qui se dérobe trop souvent sous le rebutant appareil des symboles et des formules. Il ne suffit pas de savoir. Il faut dominer de haut un sujet qu'on veut rendre accessible au plus grand nombre et cela suppose une vaste érudition, une documentation très sûre au service d'un esprit synthétique, lumineux et ferme.

On pensera peut-être que tout savant, tout professeur digne de ce nom peut, quand il lui plaît, faire œuvre de vulgarisateur, qu'il y est même conduit par la force des circonstances. Rien n'est moins exact. Certains savants éprouvent une difficulté étrange à exposer leurs découvertes même à des adeptes. C'est pis encore s'il s'agit d'écrire. Je connais des chercheurs qui, doués des plus belles qualités d'invention, de l'esprit critique le plus affiné, voient cependant dans la rédaction du mémoire qui doit couronner leurs efforts quelque chose comme un épouvantail, un effroyable pensum. Ils l'esquiveraient, si la chose était seulement possible.

J'ajouterai qu'à mesure qu'une pléiade de chercheurs plus nombreux se presse à la porte de laboratoires devenus trop étroits, il semble que la belle tradition, le goût même du pur style scientifique, je parle du style que les Laplace, les Arago, les Dumas, avaient su créer pour en revêtir leurs découvertes, s'il subsiste encore dans les œuvres d'un Poincaré par exemple (je ne veux citer que des morts) n'a

pas de tendance à se diffuser dans la masse, même en s'y démocratisant. Parmi nos aspirants au doctorat, un trop grand nombre de nouveau venus néglige d'acquérir le minimum de culture littéraire indispensable. Ces jeunes gens ne savent plus éviter l'équivoque, ils emploient les mots à contresens et non contents d'être grammaticalement incorrects, ils deviennent parfois inintelligibles. C'est, dans notre domaine, la crise dont on a tant parlé de par ailleurs, crise que beaucoup ne veulent point voir, mais que bientôt, je le crains, personne n'osera plus contester.

Si, des savants, nous passons aux professeurs, nous devons d'abord laisser de côté tous ceux qui, n'ayant puisé que dans les manuels une érudition de seconde main, sont donc incapables de donner à autrui des idées bien originales. Mais ce type tend heureusement à disparaître. Si l'enseignement scientifique de nos lycées ne donne parfois que des fruits médiocres, cela tient plus à la surcharge des programmes, à l'impatience des parents trop hâtés de pousser leurs fils vers un baccalauréat trop facile, qu'à la qualité actuelle-

ment très haute de l'enseignement donné par les maîtres.

Tout bon professeur fait, dans sa classe, œuvre de vulgarisateur, mais dans des conditions qui lui facilitent singulièrement la tâche. Il s'adresse à un auditoire relativement homogène et discipliné. L'enseignement dont il a la charge fait partie intégrante d'un système coordonné, presque équilibré même, dans lequel chaque discipline peut et doit s'appuyer constamment sur les autres. La leçon d'aujourd'hui est préparée par celle d'hier ; elle n'introduit qu'un nombre restreint d'idées et de faits nouveaux qui doivent se succéder dans un ordre logique. Au reste les modèles dont le professeur peut s'inspirer abondent, bons ou mauvais, sous la forme de livres classiques parmi lesquels les pires ont encore le mérite de reproduire seulement un peu affadie, un peu languissante, une tradition d'ailleurs fort bonne. Cette tradition résulte d'une lente évolution, parallèle à celle de la Science. Tout le fatras des tentatives avortées, contradictoires, des théories prématurées, tout le pénible échafaudage des

matériaux de fortune, en a été éliminé par des exclusions progressives; et si le maître sait donner un peu de vie à sa classe, rien ne masque aux yeux de l'élève la belle ordonnance des parties achevées de l'édifice, éternellement en construction, de notre Science.

Et puis, le professeur est en face de ses élèves. Il lit sur leur visage l'intérêt qu'il éveille ou l'ennui qu'il distille. Dans les deux cas, maître et écoliers collaborent et l'enfant, par la franchise de son attitude, par la naïveté de ses réponses, reflète, comme un miroir trop fidèle, les moindres défauts de l'enseignement qu'il reçoit.

L'auteur d'un livre de vulgarisation est privé de cette excitation bienfaisante. La critique sur laquelle il est en droit de compter, prend à son égard des formes moins inoffensives, si même elle ne revêt la plus cruelle de toutes en ignorant systématiquement le livre et son auteur.

Sachant donc qu'il ne doit compter que sur lui-même, ne connaissant rien de la personnalité de ses lecteurs en dehors de la curiosité scientifique qu'il doit supposer commune

à tous et du manque probable, chez plusieurs, d'une coordination suffisante entre les notions de toute espèce auxquelles il sera contraint de faire appel, il court le risque de lasser les uns par les explications même dont le manque le rendrait inintelligible aux autres. Sans cesse ballotté entre la crainte de ne pas être compris et l'impérieux souci d'être bref, il se débat aux prises avec le plus terrible dilemme. Il n'a qu'une chance de salut : c'est d'être soulevé par la puissance de sa pensée et d'entraîner après lui le lecteur grâce à la beauté des perspectives qu'il lui découvre, au charme du style dont il revêt tout ce qu'il touche.

N'oubliez pas qu'il est conduit à s'attaquer aux sujets les plus neufs ; que, pour satisfaire une curiosité légitime, il doit souvent s'aventurer sur un sol mal consolidé, peu propre à porter les assises d'un édifice stable. Quel travail doit-il faire à lui tout seul : travail d'élimination, de concentration, de synthèse qui lui permettra de fondre dans un raccourci lumineux les éléments épars dans les mémoires originaux, rarement déjà rassemblés plutôt mal que bien, dans quelque ébauche

de traité didactique. Il passera pour incompétent s'il laisse percer quelque chose du sentiment d'insécurité dont il ne peut se défendre, devant la fragilité d'hypothèses, de théories qu'il devine caduques, qu'il doit cependant exposer, ne serait-ce que pour jalonner la route, pour poser un premier fil conducteur dans le dédale des faits mal assemblés.

Et comment échapperait-il au frisson que suscite cette infinie perspective d'énigmes nouvelles que toute tentative, même heureuse, dans la recherche de la vérité, fait surgir des fonds insondables de la réalité matérielle ? Aura-t-il le talent de rendre son émotion contagieuse, de faire passer dans l'âme de ses lecteurs la profonde impression de beauté, j'oserai dire de poésie suprême qui se dégage du conflit incessant de la pensée de l'homme et du monde extérieur sur lequel elle projette ses éclairs.

On doit savoir gré à M. Houllevigue, savant très apprécié pour ses recherches originales et professeur d'Université éminent, de n'avoir pas hésité à sacrifier à la vulgarisation les rares loisirs que lui laissent ses travaux de

laboratoire et les obligations très lourdes de l'enseignement dont il est chargé à la Faculté des Sciences de Marseille.

M. Houllevigue est déjà connu du public cultivé par trois volumes où se révèle sa maîtrise.

Dans le premier dont le titre (*Du laboratoire à l'usine*) indique suffisamment l'objet, il s'attache à montrer, sur une série d'exemples empruntés pour la plupart aux applications industrielles de l'électricité, comment la recherche désintéressée des savants amène les plus grandes révolutions économiques, créant des industries nouvelles, transformant les anciennes, sans que l'ingénieur qui réalise ces merveilles ait autre chose à faire que de répéter, en les amplifiant à une énorme échelle, de très simples expériences de laboratoire.

Le second volume, *L'Évolution des Sciences* et le troisième, *Le Ciel et la Terre*, s'attaquent aux plus hauts problèmes de philosophie scientifique intéressant la constitution de la matière, l'organisation des mondes et leur évolution. En se livrant à ces hautes spécula-

tions, l'auteur ne perd jamais de vue l'expérience, base unique de nos connaissances. M. Houllevigue est un guide sûr, avec lequel le lecteur ne risque pas de se laisser égarer. On sent que l'auteur possède à fond les matières qu'il veut rendre accessibles au lecteur non initié et c'est pourquoi ses livres, écrits dans une langue élégante et probe, paraissent si attrayants même aux spécialistes.

En accordant à M. Houllevigue le prix Hébert, l'Académie des Sciences n'a fait que consacrer une réputation justement acquise et qui ne fera que s'accroître.

La Matière, tel est le titre du nouveau volume de M. Houllevigue, titre plein de promesses, qu'il a dû, j'imagine, éprouver quelque hésitation à écrire. Car si la matière est l'objet permanent des investigations physiques, à peine la Science actuelle peut-elle se flatter d'en avoir fixé quelques aspects, qu'il est bien difficile d'envisager en si peu de pages.

Je songeais, en les parcourant, ces pages, à tout le chemin que laissent derrière eux les hommes de ma génération. Aurions-nous pu,

il y a seulement trente ans, en écrire une seule? Sans doute quelques-uns des problèmes qui y sont résolus ne peuvent passer pour bien nouveaux. Ils furent posés, du moins pressentis par les plus anciens philosophes grecs dont la tradition nous soit parvenue. La matière est-elle un tout continu? Sinon, quelle structure doit-on lui attribuer? Les molécules, les atomes ont-ils une réalité saisissable? Peuvent-ils se manifester assez directement à nous pour nous permettre de les peser, de les dénombrer? Quelles sont leurs dimensions? Ont-ils eux-mêmes une structure? Ne faudra-t-il pas en venir, avec Pascal, à voir dans chacun d'eux un monde en raccourci et, dans les particules infimes de ces microcosmes, d'autres mondes à l'infini?

Au premier de ces échelons, tout au moins, la structure discontinue de la matière est presque devenue une réalité tangible. Non qu'on puisse se flatter de *voir* une molécule. Nos organes, agrégats de tissus dont chaque cellule est elle-même un organisme, nos instruments dont chaque pièce est un entassement moléculaire formidable, nous parquent

dans un monde à notre échelle, d'où nulle issue ne nous permet de nous échapper. Ils ne nous montrent que continuité apparente, là où nous sommes le plus convaincus que règne la discontinuité, la discontinuité seule se prêtant à nous fournir une image intelligible et adéquate de la réalité.

Seule donc la pensée, appliquée à interpréter l'expérience, nous ouvre vers l'au-delà matériel une route sûre et c'est une voie purement logique. Notre certitude se fonde sur la cohérence des hypothèses, sur la convergence presque merveilleuse des calculs qui, à partir des phénomènes les plus divers, par les chemins les plus directs comme par les plus détournés, nous conduisent invariablement aux mêmes conclusions générales, aux mêmes chiffres significatifs suivis de tant de zéros que notre imagination impuissante se refuse à nous représenter l'énormité des nombres qu'ils expriment.

Au second degré de notre analyse, quelle idée particulière nous ferons-nous des atomes réunis dans la molécule ? Notre pensée ne saurait les former qu'à l'image même des

corps dont il s'agit d'expliquer la constitution. On en a fait, suivant les cas, de petites sphères solides douées ou non d'élasticité, des sortes de cristaux anisotropes, des assemblages complexes d'éléments divers, atmosphères éthérées, électrons, etc. On les a aussi réduits à de simples centres de forces, dénués eux-mêmes de dimensions, mais remplissant à chacun tout l'espace que pénètre leur champ d'action. Au point où nous en sommes, la matière n'est-elle pas aussi mystérieuse que la force? Avons-nous le droit d'attribuer à l'une de ces entités plus de réalité qu'à l'autre?

On sait mieux comment grouper les atomes au sein de la molécule. Le lecteur connaît sans doute le symbolisme qui a été d'un si puissant secours aux chimistes pendant le cours du dernier demi-siècle. Ce fut, c'est encore entre leurs mains un admirable outil de recherche et l'on doit y voir tout au moins une image très suggestive de la réalité. Des mesures d'ordre purement physique, relatives aux points de congélation, à la réfraction, aux propriétés magnétiques et optiques les

plus diverses, viennent chaque jour corroborer, éclairer les déductions proprement chimiques qui servirent de base au système. Elles traduisent par des différences numériques très nettes les divers modes de liaison et d'ordonnance qu'on avait été conduit à imaginer pour rendre compte de la variété presque indéfinie des combinaisons organiques.

Est-il besoin de rappeler que, lorsque les schémas plans n'ont plus suffi, on en a créé d'autres dans l'espace (stéréochimie) ? Les chimistes de l'avenir ne se trouveront-ils pas incités à suivre les mathématiciens jusque dans l'espace imaginaire à quatre dimensions ou plus ? Ce ne serait au fond qu'une manière d'introduire des variables nouvelles, le temps par exemple, dont la notion devient si obscure et dont l'action mystérieuse, qu'on supposait hier encore bornée aux transformations de la matière vivante, envahit aujourd'hui toute la chimie des réactions limitées et des équilibres, l'étude des colloïdes, des corps radioactifs, bref la Science entière, ou peu s'en faut.

Nous allons essayer de suivre M. Houlle-

vigue dans la voie d'apparence si aisée qu'il nous trace à travers des domaines presque vierges.

Pour pénétrer dans ces régions mystérieuses, nos devanciers n'avaient à leur disposition que le microscope. Les découvertes qu'il amena dans le monde des infiniment petits sont sans doute inappréciables. Mais la puissance de cet instrument a ses limites, que l'ingéniosité de nos constructeurs est bien près d'avoir atteintes. Pour aller au delà, M. Houllevigue nous offre l'ultramicroscope.

Faisons pénétrer un rayon de soleil dans une chambre noire, en ayant soin de nous tenir en dehors du trajet des rayons. Aussitôt d'innombrables grains de poussière, des filaments ténus, détritus infimes, germes de toute sorte que nous ne voyons pas à la clarté diffuse du jour, que nous ne verrions pas davantage en plein soleil, nous apparaissent comme des points ou des lignes brillantes tourbillonnant en essaims dont l'œil s'amuse à suivre les évolutions. Ces petits corps sont trop menus pour être *vus*. S'ils se manifestent

comme des points brillants, sans dimensions appréciables, c'est grâce à un mécanisme spécial de diffusion lumineuse et de diffraction.

Aidons-nous maintenant d'un dispositif optique approprié. Concentrons les rayons solaires ou ceux d'une puissante source artificielle en un faisceau très convergent et pointons un excellent microscope normalement à l'axe du faisceau. Des corps encore bien plus petits vont apparaître comme des points de moins en moins brillants, des étoiles de dixième, de douzième grandeur. Nous aurons réalisé un ultramicroscope.

Quand sur le trajet des rayons on interpose un milieu trouble, l'ultramicroscope résout souvent son opalescence, comme les puissantes lunettes des astronomes résolvent certaines nébuleuses, en un fond noir sur lequel se détachent un grand nombre de points brillants. Mais ce qu'il y a de particulièrement remarquable ici, ce sont les mouvements rapides, capricieusement irréguliers de ces points. Chacun d'eux décrit une ligne brisée indépendante formée de segments rectilignes

dont les longueurs et les directions varient au hasard, dessinant les figures les plus compliquées. C'est ce qu'on nomme le *mouvement brownien*, du nom d'un naturaliste anglais qui, à l'aide d'un microscope ordinaire, reconnut de tels mouvements à l'intérieur des cellules vivantes et jusque dans des inclusions liquides, au sein d'échantillons de divers cristaux.

Ce mouvement brownien est l'image du mouvement moléculaire imaginé par les physiciens pour interpréter la pression qu'un gaz, supposé formé d'un très grand nombre de molécules indépendantes, exerce sur toute paroi qui le limite. Chacune des molécules vole comme une flèche, vient heurter une autre molécule et rebondit dans une direction et avec une vitesse différentes, pour rebondir encore et encore. Telle une balle qui serait l'objectif d'une multitude de raquettes aux mains de joueurs parfaitement inintelligents. Si, parmi ces molécules irrégulièrement bondissantes, dont la vitesse moyenne dépasse celle de nos projectiles les plus rapides, nous en disposons une de très gros

calibre, mille fois, cent mille fois plus lourde, cette masse imposante, sollicitée par les chocs innombrables des petites molécules, devra elle-même se mouvoir d'une façon irrégulière. Capricieusement ballottée par tous ces chocs, elle les fondra dans un mouvement résultant de même caractère mais d'autant moins ample, d'autant plus lent et apaisé qu'elle est elle-même plus grosse. Tel un gros navire désemparé, assailli par des vagues folles, reproduit avec un rythme élargi dans le temps et raccourci dans l'espace les mouvements individuels de toutes ces vagues. On conçoit donc comment le mouvement des molécules, à la fois beaucoup trop rapide et trop ténu pour tomber sous nos sens, se transforme en un mouvement à notre échelle que nous pouvons désormais étudier. Et comme nous connaissons la masse des gros mobiles, grains de gomme gutte ou de mastic employés par M. Perrin, simples poussières pour nous, masses monstrueuses à l'égard des molécules, on comprend que, par l'application des principes de la mécanique, nous puissions descendre jus-

qu'à celles-ci, calculer leurs masses, en faire l'exact dénombrement.

Les liquides plus ou moins opalescents dénommés *colloïdes* montrent à l'ultramicroscope leurs micelles baignant dans la masse liquide au sein de laquelle elles s'agitent. Le problème de la constitution de ces corps, qui sont les éléments du monde vivant, est donc intimement lié à celui du mouvement brownien. Il sollicite en ce moment toute l'attention des biologistes.

Nous retrouvons le mouvement moléculaire avec ce curieux petit instrument, le spinthariscope, dans lequel les rayons α émanés du *radium* se résolvent en une pluie d'étincelles. Chacune d'elles est due à une particule d'hélium qui, dégagée du radium et arrêtée par une substance phosphorescente, transforme sa force vive en lumière, à la façon des étoiles filantes amenées à l'incandescence dans la traversée de notre atmosphère.

Avec le radium, dont la découverte fut un triomphe de la Science française, nous pénétrons dans le recoin le plus merveilleux du

monde moléculaire. Nous n'assistons à rien moins qu'à la destruction spontanée d'un élément métallique bien défini, et à toute une hérédité d'éléments les uns gazeux, les autres solides qui se résolvent les uns dans les autres, donnant, après de longs siècles, une sorte de réalité aux rêves tant caressés par les alchimistes : la transmutation des métaux et l'élixir de vie. Il est vrai que le terme ultime des transformations du radium n'est pas de l'or, mais, semble-t-il, du plomb; et que, si la médecine fonde sur l'emploi du radium de grandes espérances pour la guérison de quelques-uns des maux qui nous affligent, ce n'est pas à la façon d'une source de vie qu'il se révèle, mais plutôt comme un formidable agent de destruction et de mort, aussi dangereux pour nos tissus que pour les végétations parasites dont il les délivre.

La destruction du radium s'accompagne de l'émission de rayons α, β et γ. Les premiers sont formés de particules d'hélium électrisées positivement, les seconds d'électrons négatifs animés de vitesses comparables à celles de la lumière. Et voilà la théorie de l'émission qui

renaît en quelque sorte de ses cendres, avec le fluide électrique négatif également transformé et rajeuni. Et voilà encore que le radium nous apparaît comme un réservoir d'énergie hors de proportion avec tout ce que nous connaissons, combustibles ou explosifs ; mais c'est un réservoir d'énergie dont nous ne possédons pas la clé, dont nous ne pouvons régler la dépense.

Le radium, ses dérivés, ses congénères possèdent, tout comme nous, une *vie moyenne*. Or tandis que les savants ont réussi à prolonger la durée de notre existence en écartant de nous de terribles fléaux, ils sont encore désarmés pour enrayer la marche inéluctable des transformations de la matière radioactive. La vie moyenne du thorium se chiffre par centaines de millions de siècles, celle du radium A n'est que de trois minutes. Que représente par rapport à cet énorme intervalle, que les découvertes futures ne peuvent manquer d'étendre encore, la pauvre longévité d'un éléphant ou d'un chêne comparée à la brièveté de l'évolution des cellules les plus éphémères?

Un autre groupe bien curieux est constitué par ce qu'on nomme les *terres rares*. Les minéraux d'où on les extrait contiennent, étroitement associées, deux familles voisines de métaux dont les poids atomiques s'échelonnent dans un très large intervalle, mais dont les propriétés générales sont si voisines que toutes les ressources de la chimie analytique se seraient trouvées impuissantes pour opérer leur séparation complète, sans l'aide et le contrôle continu des méthodes physiques les plus délicates. C'est surtout à la Science française que revient l'honneur d'avoir su caractériser tous ces éléments, sans confusions ni doubles emplois, et cela grâce à un travail fort subtil d'où sont sorties les découvertes du gallium par M. Lecoq de Boisbaudran, du lutécium et du celtium par M. Urbain qui n'a sans doute pas encore épuisé la liste.

Voici une autre famille de corps remarquables, cette fois, par leur inertie, leur impropriété à prendre part à une réaction chimique quelconque. Ce sont les gaz rares dissimulés dans l'air que nous respirons. Ils s'y cachaient si bien que l'un d'eux, l'hélium,

fut plus tôt découvert dans l'atmosphère solaire que dans la nôtre. On l'a ensuite extrait d'un minerai très rare, la clévéite, avant de s'apercevoir que quelques-unes de nos sources thermales en dégagent des torrents et que c'est l'un des résidus essentiels des transformations radioactives. Ses compagnons sont l'argon, le néon, qui aux mains de M. Claude, a fourni une si belle lumière couleur de feu et ces gaz encore bien plus rares, le crypton et le xénon qui n'entrent dans la composition de notre atmosphère que par des dix, des cent millionièmes ou moins.

Mais, comme le fait observer M. Urbain, il n'y a de corps vraiment rares que ceux dont on ne connaît pas d'applications pratiques ; car, dès qu'on a en découvert quelqu'une, l'ingéniosité des inventeurs retrouve ces corps partout. Quelques difficultés que comporte leur extraction, l'intérêt matériel est le plus fort et les surmonte ; ainsi en fut-il pour le cérium et le thorium : l'invention du bec Auer les a rendus d'abord désirables, bientôt après presque communs.

Mais notre atmosphère ne contient pas que

des gaz rares. Elle est formée pour les quatre cinquièmes d'azote, un grand dédaigné, auquel l'industrie moderne est en train de rendre justice. Ce gaz dont le nom signifie impropre à la vie, n'est-il pas un élément essentiel de ces matières albuminoïdes qui forment la plus grande part de nos tissus vivants? Et l'azote n'est pas moins nécessaire à la vie des plantes, auxquelles la grande culture le fournit sous la forme de fumier de ferme ou d'engrais coûteux importés du Chili, alors que, grâce au travail de certains microbes bienfaisants, on n'a qu'à le puiser gratis dans l'atmosphère. Il ne tarde pas d'ailleurs à y retourner par un cycle de transformations susceptibles de se reproduire indéfiniment.

L'azote est encore un élément essentiel des explosifs et notamment des poudres sans fumée, agents incomparables de destruction ou de défense, mais qui comptent à leur passif des catastrophes trop récentes pour qu'on en ait perdu le souvenir. On se préoccupe avec succès de diminuer les dangers de la conservation de ces poudres en retardant le plus pos-

sible, surtout en rendant manifestes par des signes aisés à constater, les altérations auxquelles elles sont sujettes. Ici encore s'impose la notion de vie moyenne ; mais d'une vie moyenne dont nous sommes heureusement en mesure de prolonger la durée.

L'azote et l'oxygène atmosphériques, mêlés dans l'air en proportions convenables pour entretenir la respiration animale, n'acquièrent une haute valeur industrielle que par leur séparation à peu près complète. Pour les isoler l'un de l'autre, et aussi pour préparer à l'état de pureté les autres gaz de l'atmosphère, le procédé le plus commode est aujourd'hui leur liquéfaction préalable. La liquéfaction de l'air, procédé industriel de préparation de l'oxygène ! Voilà qui eût semblé bien paradoxal, alors qu'on nous enseignait, il y a cinquante ans à peine, l'impossibilité de cette liquéfaction. Mais un jour Cailletet, en utilisant le froid produit par la détente de l'air parfaitement sec, obtient et montre aux savants la première goutte d'air liquide. On en produira bientôt des litres, des mètres cubes. Et comme la houille accumule en nos mains

l'énergie calorifique sous une forme éminemment transportable, les gaz liquéfiés deviennent, si l'on peut dire, des accumulateurs de froid. Nous avons appris à les conserver, à les utiliser pour nos besoins. Ils résolvent le problème inverse de celui du chauffage. Si on ne s'en sert pas encore couramment pour rafraîchir en été nos maisons européennes, nous avons des wagons, des navires frigorifiques et cette industrie du froid, appliqué à la conservation et au transport des denrées périssables, a pris presque soudainement, dans les pays de production intensive, une ampleur, une extension que l'on a peine à imaginer dans notre pays où cependant cette industrie prit naissance.

Et, puisque nous parlons de la conservation des aliments, notre nourriture, considérée dans son ensemble, n'est-elle pas quelque peu barbare? La consommation de la chair d'animaux supérieurs n'a-t-elle rien de répugnant? N'est-ce pas le rôle de la Science de nous procurer une alimentation moins inélégante, plus subtile et s'il se peut, plus saine?

On établissait jadis comme une barrière infranchissable entre la chimie minérale et la chimie organique. Aujourd'hui les produits de synthèse exclusivement formés aux dépens d'éléments minéraux abondent. Les chimistes fournissent à la parfumerie, même aux industries culinaires, des succédanés de produits naturels que la fraude n'a d'ailleurs pas manqué d'utiliser aussitôt. Parmi ces parfums, ces condiments artificiels, il en est qui impressionnent fort agréablement nos nerfs olfactifs ou nos papilles gustatives. Plusieurs ne sont pas plus nocifs que les produits similaires créés dans l'intimité des cellules vivantes dont ils ne semblent d'ailleurs constituer que de simples déchets.

Mais si les chimistes savent préparer artificiellement des essences très rares, même certains sucres, ils n'ont pas encore découvert le secret de la synthèse des matières amylacées et albuminoïdes, infiniment plus précieuses en elles-mêmes puisqu'elles sont indispensables à la vie. La boutade d'un Berthelot, rêvant d'une pilule synthétique pour remplacer un de nos grossiers repas, devien-

dra-t-elle, comme tant de rêves du passé, une des réalités de l'avenir?

J'en ai dit assez pour caractériser la manière de M. Houllevigue. Il vous conduit, comme au cours naturel d'une conversation mondaine, à travers les objets d'étude les plus variés et les plus neufs. Mais il ne se contente pas de les effleurer à son caprice. Sa parole est toujours celle d'un maître qu'il est impossible de prendre en faute. Dirai-je qu'en mainte page de ce livre j'ai trouvé moi-même à glaner des faits nouveaux, des détails curieux que j'ignorais?

Le volume contient encore des considérations sur les phénomènes de catalyse et sur les propriétés si curieuses des cristaux liquides découverts, il y a plus de trente ans, par M. Lehmann. Les premières publications de ce savant ne purent triompher des préjugés régnants. Elles seraient sans doute oubliées si, avec une persévérance, une ténacité bien exceptionnelles, leur auteur ne s'était obstiné sur ces études dédaignées jusqu'à ce qu'il eût définitivement assuré le triomphe de ses idées originales.

Et nous voici au bout. En fermant un livre si attrayant, si véritablement instructif, bien des lecteurs se diront comme moi : Eh quoi? C'est déjà fini? Espérons que M. Houllevigue trouvera prochainement le loisir de nous donner la suite.

E. Bouty.

L'ULTRAMICROSCOPIE

L'ULTRAMICROSCOPIE

Il y a autant d'infini dans un grain de poussière que dans tout le firmament. Tandis que le télescope et la lunette nous ouvrent largement le monde des étoiles, le microscope nous fait pénétrer chaque jour plus profondément dans le monde de l'infiniment petit ; nous arrivons presque à voir les molécules et à consolider par le témoignage de nos sens les résultats conquis à la pointe du raisonnement. Dès à présent, la théorie cinétique de la matière est devenue une *certitude physique* : tout cela est devenu l'œuvre du microscope ; c'est pourquoi il est intéressant de montrer comment cet instrument s'est perfectionné, au cours des siècles, depuis l'an 1590, où Zacharie Jansen, lunetier à Middelburg, en créait le premier exemplaire en fixant deux verres grossissants aux extrémités d'un tube de cuivre.

Les premiers microscopes, avec lesquels les

naturalistes hollandais du XVIIe siècle ont fait de si belles découvertes, grossissaient de vingt à cinquante fois en diamètre ; ils donnaient des images peu nettes et irisées. Mais l'art et la science ont associé leurs efforts ; aux lunetiers ont succédé les opticiens et ceux-ci ont profité à leur tour des progrès de l'optique théorique ; c'est ainsi qu'on vit en Angleterre, pendant tout le XVIIIe siècle et jusqu'au seuil du XIXe, toute une génération de constructeurs, les Dollond, perfectionner les instruments d'optique et, entre autres, le microscope ; on doit à l'ancêtre de cette lignée, John Dollond, d'avoir montré combien les images pouvaient être améliorées en substituant à chacun des deux verres de Jansen, oculaire et objectif, des assemblages de plusieurs lentilles : c'est le principe des oculaires et des objectifs composés dont les microscopes modernes sont constitués.

Mais c'est en Allemagne, et à notre époque, qu'on trouve l'exemple le plus topique d'une association triomphante de la technique industrielle et de la science pure. A Iéna, s'est constituée, avec l'appui de l'État et les subsides des constructeurs intéressés, cette magnifique verrerie, aujourd'hui justement célèbre, qui ne s'est pas contentée de souffler des bouteilles et de

tailler des bouchons de carafe, mais où des techniciens, qui sont en même temps des savants, ont créé toute une série de verres et de cristaux, faisant varier progressivement les proportions des divers constituants, substituant à la chaux des proportions variées de baryte, d'oxyde de zinc, introduisant dans la masse tous les corps capables de s'y incorporer en un verre transparent : didyme, urane, bore, manganèse, arsenic, enfin étudiant minutieusement toutes les propriétés des corps ainsi obtenus. Parallèlement, les constructeurs perfectionnaient la taille des verres et la construction mécanique des appareils, tandis que des physiciens, comme Abbe, établissaient, au prix d'un incessant labeur, les meilleures conditions de fonctionnement du microscope.

On ne se fait pas une idée de ces difficultés quand on ne connaît que la théorie élémentaire du microscope, établie à l'usage des futurs bacheliers, et qui n'est qu'un tissu d'approximations. En réalité, l'image d'un point lumineux n'est pas un point géométrique, mais une surface compliquée qu'on nomme une *caustique* et de plus, chacune des couleurs constitutives de la lumière blanche donne une image différente ; toutes ces images rouge, jaune, verte, bleue, ne

se recouvrent pas exactement et ne sont pas au point en même temps, si bien que l'image vue dans le microscope est bordée d'irisations qui changent avec la mise au point. Il a fallu corriger ces défauts ; on y est parvenu, avec une perfection presque complète, en développant les principes de John Dollond, et en formant chacune des lentilles de l'oculaire et de l'objectif avec plusieurs sortes de verre dont la qualité, les courbures, la place et les dimensions ont été soigneusement calculées. Enfin, on a réalisé un gain nouveau en imaginant *l'immersion homogène :* la préparation, en général transparente et éclairée par en dessous, est recouverte par une mince lamelle, le couvre-objet, qui n'est éloignée de la lentille frontale de l'objectif que de quelques dixièmes de millimètre ; dans cet étroit intervalle, on intercale un liquide transparent et très réfringent, huile de cèdre ou monobromonaphtaline. Cet artifice présente de nombreux avantages ; il facilite l'entrée dans le microscope à un grand nombre de rayons lumineux émanés de l'objet et qui, sans cela, se réfléchiraient sur la lentille frontale de l'objectif ; il permet, en outre, d'obtenir des images plus nettes et un grossissement plus élevé.

Ce n'est pas tout d'obtenir des images agran-

dies ; encore faut-il les éclairer fortement ; avec un grossissement de mille diamètres, l'image est un million de fois plus grande que l'objet, par suite un million de fois moins lumineuse ; il faut donc recueillir la lumière d'une source puissante et la concentrer sur le point visé de la préparation. Les microscopistes empruntent souvent, à cet effet, l'artifice des cordonniers italiens qu'on voit, sur le pas de leur échoppe, éclairant leur travail à l'aide d'une fiole pleine d'eau qui concentre la lumière du jour. Mais il existe des condenseurs plus perfectionnés, formés d'un miroir concave et de plusieurs verres convergents. Il faut avoir pratiqué le microscope et lui avoir demandé tout ce qu'il peut rendre pour apprécier l'importance de cette question : un éclairage vaut moins par la quantité de lumière réunie sur l'objet que par la direction des faisceaux éclairants, qui doivent converger au point précis que vise le microscope ; si l'on s'écarte de ces conditions optima, l'image se transforme et présente les aspects les plus changeants ; toute une fantasmagorie de formes et de couleurs défile sous l'œil de l'observateur, incapable de savoir où est la réalité. C'est pourquoi l'emploi des meilleurs microscopes modernes, avec les plus forts grossissements, est une opération qui

requiert beaucoup d'expérience et d'habileté technique.

*
* *

Voyons maintenant les résultats. Prenons le meilleur microscope ; il est muni, comme on sait, d'un double jeu d'objectifs et d'oculaires interchangeables, qui permettent de passer, sans toucher à la préparation, des faibles grossissements, cinquante diamètres, aux plus élevés, mille, deux mille diamètres. Regardons une même préparation avec des grossissements croissants. Avec cinq cents diamètres, nous distinguerons plus de détails qu'avec cinquante, avec mille plus qu'avec cinq cents; mais quand nous passerons de mille à deux mille, bien que l'image nous paraisse quatre fois plus étendue en surface, *nous ne distinguerons pas plus de détails ;* autrement dit, nous avons atteint la limite du *pouvoir séparateur* de l'instrument. Ce qui se passe est analogue à ce que chacun a observé en cherchant à agrandir un cliché photographique ; un moment vient où on ne gagne plus rien à accroître les dimensions de l'image. On peut donc définir, pour le microscope, un pouvoir séparateur, déterminé par la plus petite distance de deux points que l'instrument permet

de distinguer. Notre œil permet, sans l'interposition d'aucun instrument, de séparer deux points dont la distance n'est pas inférieure à un vingtième de millimètre : et cette donnée de l'expérience concorde avec la constitution de la rétine, formée d'une mosaïque de cônes et de bâtonnets dont chacun forme l'aboutissement d'un des filaments juxtaposés dans le nerf optique; l'œil ne distingue que des images formées sur des éléments non contigus de la mosaïque rétinienne. Si maintenant, on arme l'œil d'un microscope grossissant mille fois, il semble qu'on puisse distinguer deux points de l'objet mille fois plus rapprochés qu'à l'œil nu, c'est-à-dire distants d'un vingtième de micron[1]; or ce pouvoir séparateur est bien loin d'être atteint; les meilleurs instruments atteignent tout juste trois ou quatre dixièmes de micron ; encore cette limite n'est-elle réalisée que dans les conditions les plus favorables, par exemple lorsqu'on observe les traits d'un réseau tracé sur le verre, les cils de certains infusoires ou l'enveloppe striée de quelques diatomées. Nous sommes donc aussi incapables de voir les molécules, avec le meilleur microscope,

1. Le *micron* vaut un millième de millimètre et le *millicron* encore mille fois plus petit, représente un millionième de millimètre.

que de distinguer à l'œil nu, à 20 kilomètres de distance, les abeilles en mouvement d'un essaim.

On pourrait espérer que la limite actuellement atteinte n'a rien de définitif et que les microscopes de l'avenir, mieux corrigés des imperfections que nous avons signalées, atteindront un pouvoir séparateur dix fois, vingt fois plus élevé. Par malheur, il n'en est rien ; il ne serait pas difficile d'ajouter de nouveaux verres à l'oculaire et à l'objectif, de manière à obtenir des images *théoriquement* plus nettes ; mais ces efforts seraient vains. En effet, la théorie du microscope, comme celle des autres instruments d'optique, a été établie par les méthodes de l'optique géométrique, en imaginant des rayons lumineux qu'on fait réfléchir sur les miroirs ou passer à travers les lentilles suivant les lois de la réflexion et de la réfraction ; le problème de physique se trouve ainsi ramené à un problème de géométrie. Mais tout cela est une pure fiction ; il n'y a pas, dans la nature, de point lumineux, ni de rayon lumineux, pas plus qu'il n'y a de point ni de ligne géométrique ; il y a des sources lumineuses, plus ou moins étendues, et des ondes qui se propagent à partir de ces sources.

Vu sous cet angle, qui correspond seul à la réalité physique, le problème change de nature.

La solution en a été donnée, avec une rare élégance, par le grand physicien anglais Lord Rayleigh, et voici ce qu'elle nous apprend : quelle que soit la perfection du système optique traversé par la lumière, chaque élément de l'objet lumineux donne pour image un petit cercle à bords estompés, plus large si la lumière est rouge, moins large en lumière violette, plus étroit encore en lumière ultraviolette. La théorie permet de ramener au minimum le diamètre de ces petites taches qui correspondent à chaque élément rayonnant de l'objet ; mais, en aucun cas, il n'est possible de l'annuler. Deux points de l'objet ne paraîtront séparés que s'ils donnent des taches distinctes et, comme en augmentant le grossissement, on accroît en même temps le diamètre des taches « de diffraction », on conçoit aisément qu'il puisse arriver un moment où l'on ne gagne plus rien à accroître ce grossissement. En fait, la théorie conduit à une limite du pouvoir séparateur qui est précisément la limite atteinte aujourd'hui par les meilleurs microscopes.

Mais la nature n'a jamais posé à l'homme de barrière infranchissable ; tout de suite et sans rien changer aux méthodes d'observation, nous pouvons améliorer le rendement du microscope

en substituant, pour l'observation, la lumière bleue ou violette à la lumière blanche. Les cercles de diffraction se trouvent ainsi légèrement rétrécis et les détails apparaissent avec plus de finesse ; les naturalistes connaissent depuis longtemps cet artifice et l'ont utilisé pour étudier les plus fins détails de la structure des diatomées. La faible sensibilité de l'œil pour la lumière bleue ou violette rend ce progrès assez illusoire ; mais on peut aller plus loin, et avec plus de profit, dans cette voie, en employant comme source éclairante les radiations ultraviolettes qui émanent d'une forte étincelle éclatant entre deux fils de magnésium ou de cadmium. Il est vrai qu'on se heurte alors à une série de difficultés nouvelles : ces radiations sont invisibles pour notre œil et sont arrêtées par les verres des microscopes ordinaires. M. Köhler en a pourtant triomphé, en 1904, en construisant un microscope dont toutes les lentilles sont en quartz, ainsi que l'appareil d'éclairage et les lamelles qui supportent la préparation ; enfin l'œil est remplacé, comme instrument d'observation, par une plaque photographique sur laquelle se dessine une image agrandie qu'on peut ensuite observer à loisir, à l'œil nu ou à la loupe.

On se représentera aisément ce que la mise en œuvre d'un semblable dispositif représente de dépense, de tâtonnements et de labeur. Il faut ajouter que les radiations ultraviolettes ont une activité physiologique, qui entraîne rapidement la mort des éléments vivants soumis à leur action ; c'est un gros inconvénient pour les observations physiologiques. Un autre défaut, non moins grave, est que les colorations employées par les micrographistes pour différencier les divers éléments de leurs préparations ne sont plus visibles lorsqu'on emploie la lumière ultraviolette. Néanmoins, un grand pas en avant a été réalisé par cette méthode, puisque le pouvoir séparateur a presque doublé ; on peut maintenant différencier deux points dont la distance n'est que de deux dixièmes de micron ; au point de vue spécial de l'observation directe du groupement moléculaire, qui forme le lointain idéal du physicien, on peut dire que l'essaim, dont nous parlions tout à l'heure, n'est plus maintenant qu'à 10 kilomètres.

*
* *

Cette fois, pensera-t-on, c'est bien la fin, et il faut renoncer à tout espoir de pousser plus

avant. Au contraire, c'est le moment d'espérer, car deux savants allemands, Siedentopf et Zsigmondy, ont ouvert une voie nouvelle en créant l'ultramicroscopie : assurément, la difficulté est tournée et non résolue ; toujours est-il qu'un moyen d'investigation plus pénétrant que l'observation microscopique directe nous ouvre le monde des infiniment petits à l'instant où il paraissait se fermer pour toujours.

Rappelons d'abord quelques faits d'observation courante. Nous distinguons parfaitement les étoiles sur le fond obscur du ciel nocturne ; pourtant, leur éloignement est tel qu'il équivaut à une extrême petitesse ; une étoile de quatrième grandeur n'est pas plus grosse, à proportion, qu'une molécule d'albumine placée à 15 centimètres de notre œil et le télescope nous permet d'apercevoir des astres qui ne tiennent pas plus de place dans le ciel qu'une molécule de mercure ou de soufre n'en occupe dans le champ de la vision. Les rayons qui émanent de chaque étoile donnent sur la rétine un petit cercle de diffraction à bords estompés, qui nous paraît d'autant plus grand que la lumière reçue par notre œil est plus intense ; c'est uniquement pour cette raison que les étoiles de première grandeur nous paraissent plus grosses que les

autres, car leurs dimensions réelles sont bien au-dessous de ce que l'œil peut apprécier ; elles seraient cubiques au lieu d'être sphériques, que l'aspect ne changerait aucunement ; et il faut noter encore que les étoiles deviennent invisibles en plein jour, parce que la lumière qu'elles envoient sur nos éléments rétiniens n'est pas plus grande que celle qui est diffusée, des divers points du ciel, sur les autres parties de la rétine. Il résulte de ces observations familières qu'un corps, même extrêmement petit, peut être visible sous la triple condition d'être lumineux, de se détacher sur un fond obscur et d'être suffisamment éloigné des autres points lumineux.

Regardons maintenant un pinceau de lumière solaire qui pénètre, par un trou du volet, dans une chambre obscure ; nous y verrons des milliers de grains de poussière, incessamment brassés par les courants d'air; beaucoup de ces corpuscules sont extrêmement petits ; leur diamètre ne dépasse pas quelques microns ; s'ils étaient posés sur une table et éclairés à la manière ordinaire, nous serions hors d'état de les voir à l'œil nu ; pourtant ils sont visibles dans le rayon de soleil, parce que les ondes de la lumière solaire viennent se briser contre

chaque grain, d'où elles divergent en ondes diffractées qui viennent ensuite impressionner notre œil. C'est par suite du même effet que notre atmosphère nous paraît lumineuse dans sa masse, parce que chacun de ses points diffuse un peu de la lumière reçue du soleil. Un phénomène tout semblable se manifeste encore quand on verse dans l'eau certaines essences qui y produisent un nuage opalin ; l'essence se divise alors en milliers de gouttelettes dont chacune, diffusant la lumière qui l'atteint, agit comme si elle était devenue un point lumineux. Ces gouttelettes ont des dimensions variables avec les conditions du mélange et la couleur diffusée varie également ; en général, les gouttes les plus petites diffusent surtout la lumière bleue, tandis que les particules plus grosses émettent de préférence des radiations jaunes ou rougeâtres et ceci justifie, dans une certaine mesure, les rites méticuleux des buveurs d'absinthe, d'après lesquels l'aspect et même le goût de la mixture dépendent de la façon d'opérer le mélange. Une théorie, due encore à Lord Rayleigh, explique tous ces phénomènes ; elle montre que les particules opaques diffractent beaucoup plus de lumière que les particules transparentes de même dimension et que la lumière diffractée

par des éléments matériels de même nature varie comme le carré de leur volume ; si le diamètre des corpuscules devient deux fois plus petit, leur volume est huit fois moindre et la lumière diffractée soixante-quatre fois plus faible.

On voit, en résumant tous ces résultats, qu'un petit objet très vivement éclairé se comporte, à peu de chose près, comme s'il était lumineux par lui-même ; s'il est isolé sur un fond obscur, nous pourrons le voir, à l'œil nu ou au microscope ; nous n'aurons aucun renseignement sur sa forme, car l'image formée sur la rétine sera toujours un petit cercle ; mais nous aurons au moins constaté son existence et nous pourrons le suivre dans ses mouvements. S'il y a plusieurs points semblables dans le champ de la vision, nous pourrons les compter et, dans une certaine mesure, apprécier leur grosseur d'après la quantité et la couleur de la lumière diffractée. Enfin, nous aurons intérêt à regarder dans un microscope plutôt qu'à l'œil nu parce que la lentille frontale de l'objectif fonctionne alors comme une pupille placée tout près de l'objet visé et dans laquelle il entre plus de lumière que dans notre œil, situé nécessairement à une dizaine de centimètres de ce même objet ; un

calcul simple montre que la quantité de lumière utilisée est environ dix mille fois plus considérable dans le premier cas que dans le second.

C'est d'après ces principes que Siedentopf et Zsigmondy en Allemagne et, un peu plus tard, MM. Cotton et Mouton en France, conçurent et réalisèrent l'ultramicroscope. Nous ne décrirons ni les appareils ni le mode opératoire ; qu'il suffise de savoir que la préparation, liquide ou solide, est éclairée vigoureusement, non plus en dessous, comme dans la microscopie ordinaire, mais latéralement, de telle sorte qu'aucun rayon du pinceau lumineux éclairant ne puisse entrer dans le microscope ; ce pinceau latéral, concentré par des lentilles et limité par des diaphragmes, n'illumine la préparation que sur une épaisseur de deux ou trois microns : cette précaution est nécessaire si l'on veut que la tranche visée par le microscope se détache sur un fond bien noir ; sans cela, les millions de grains séparés, poussières de toute sorte, microbes, débris de cellules, qui pullulent dans toute préparation, deviendraient des centres de diffraction et répandraient sur tout le champ de vision une lueur diffuse analogue à celle que la voie lactée étend sur une partie du ciel. Les choses étant ainsi disposées, on n'a plus qu'à

viser la zone mince et vivement éclairée avec un microscope grossissant environ cinq cents fois en diamètre, pour voir apparaître, dans le champ obscur de la vision, des points lumineux, immobiles lorsque la préparation est solide, ou animés de mouvements variés, lorsqu'il s'agit d'un liquide ou d'un gaz.

Tout de suite, une question se pose : Quelle est la sensibilité de la nouvelle méthode? Autrement dit, quelles sont les dimensions des particules les plus ténues qu'on peut distinguer à l'ultramicroscope?

Il existe de curieux verres colorés qu'on obtient en incorporant dans la masse vitreuse en fusion des traces d'un sel d'or. Ces verres, lorsqu'on les refroidit rapidement, sont parfaitement incolores et transparents; l'or s'y trouve peut-être à l'état dissous, comme le sucre dans l'eau, ou sous forme de particules tellement petites qu'elles sont invisibles par tous les moyens connus. Au contraire, si le verre est maintenu longtemps à l'état pâteux, la masse prend une coloration rose, qui passe peu à peu au rubis, puis au bleu et au brun ; à ce moment, l'or contenu dans la masse vitreuse s'est rassemblé en petites particules visibles au micros-

cope ; il semble donc qu'il se fasse dans la pâte vitreuse une concentration progressive de l'or, que l'on peut arrêter au point voulu en refroidissant brusquement la masse ; et la couleur du verre est en rapport avec l'état des particules d'or, qui diffusent inégalement les différentes couleurs suivant leurs formes et leurs dimensions. Inversement, si on refond le verre coloré, l'or se redissout et la matière redevient incolore.

L'explication que nous venons d'esquisser avait déjà été proposée, dès 1857, par Faraday, mais elle était restée purement hypothétique, lorsque Siedentopf et Zsigmondy reprirent l'étude de ces verres par l'ultramicroscope. En taillant dans la masse des parallélipipèdes et en les soumettant à l'éclairage latéral que nous avons décrit, ils y constatèrent d'abord l'existence de nombreux points brillants, d'autant plus lumineux et moins nombreux que le verre avait été recuit plus longtemps ; l'existence des particules d'or dans les verres colorés se trouvait ainsi mise hors de doute ; mais on pouvait aller plus loin et estimer les dimensions de ces particules. L'analyse du verre fait connaître la quantité d'or contenu dans un volume déterminé ; il n'y a plus qu'à procéder à la numération des particules visibles dans le champ ultra-

microscopique, dont on connaît le volume total, c'est-à-dire la teneur en or ; la masse moyenne des particules d'or, et par suite leur volume, se trouvent ainsi mesurés. Cette méthode, appliquée à divers types de verres colorés, a montré que les dernières particules visibles à l'ultramicroscope avaient, en les supposant sphériques, un diamètre compris entre trois et six millimicrons. Il existe certainement des agglomérations moléculaires encore plus petites qui ne deviendront visibles que le jour où on disposera de moyens d'observation plus puissants ; ainsi certains échantillons de verre rubis résistent à l'analyse ultramicroscopique, bien que leur coloration soit due certainement à des particules d'or invisibles ou, comme on dit, « amicroscopiques ».

Pour nous rendre compte du pas énorme qui vient d'être franchi, donnons ici, d'après les plus récentes déterminations, le diamètre de quelques molécules :

Pour la molécule	d'hélium. . .	0,17	millimicrons.
—	de mercure. .	0,28	—
—	de chlore. . .	0,4	—
—	d'éther. . . .	0,6	—

Il suffirait donc que les molécules devinssent

dix fois plus grandes en diamètre, c'est-à-dire mille fois plus grosses, pour commencer à apparaître à l'ultramicroscope, et les grains d'or dont nous parlions plus haut ne doivent pas compter plus de mille à dix mille molécules. Bien entendu, ces résultats n'ont été obtenus qu'en réalisant les conditions les plus favorables ; les particules d'or sont opaques, elles sont immobilisées par le verre ; enfin on a utilisé la lumière solaire d'une belle journée d'été, c'est-à-dire la plus puissante source d'éclairement qui soit à notre disposition. Ils n'en sont pas moins très encourageants, puisque l'œil humain a plongé dans l'infiniment petit cent fois plus avant qu'il ne pouvait le faire il y a dix ans. Les inconvénients de l'ultramicroscope, qui n'est approprié qu'à la vision du discontinu, s'atténuent par ce fait que le monde des molécules, où nous commençons à pénétrer, est par essence le domaine du discontinu ; enfin nous ne sommes plus bloqués par un obstacle infranchissable comme celui qui s'opposait aux progrès du microscope ; nous avons le champ libre et il est probable que, le jour où on le voudra résolument, on pourra dépasser la limite atteinte par Siedentopf et Zsigmondy ; il ne sera peut-être pas nécessaire de réaliser de plus fortes concentrations de lu-

mière ; mais on pourra substituer à l'œil une plaque photographique, qui est capable d'accumuler les effets de la lumière pendant plusieurs heures, s'il est nécessaire ; le succès dépend, d'ailleurs, de la possibilité de maintenir l'obscurité absolue du fond.

Dès à présent, nous ne sommes pas à bout de ressources, et un procédé fort ingénieux permet de pousser plus loin les investigations ; c'est la méthode de *culture* d'Ostwald. Lorsqu'un liquide contient des particules amicroscopiques d'or ou d'argent, si on y ajoute un bain dans lequel ce même métal soit en voie de précipitation (on emploie de tels bains en photographie), le dépôt du métal se fait exclusivement sur les grains préexistants, qui fonctionnent ainsi comme des germes et peuvent grossir jusqu'à devenir visibles. Zsigmondy a pu, par cette méthode, engraisser des granules d'or invisibles à l'ultramicroscope jusqu'au point de les rendre visibles et de les compter ; et comme il connaissait la masse totale d'or contenu primitivement dans la liqueur, il a pu, par cette voie détournée, connaître les dimensions de ces particules qui échappaient à toute observation ; les nombres ainsi trouvés sont compris entre 1,7 et 3 millimicrons.

L'observation ultramicroscopique des liquides est loin d'être aussi aisée. La première difficulté consiste à obtenir un liquide « optiquement vide », c'est-à-dire qui ne renferme pas déjà des milliers de particules solides en suspension, provenant d'origines diverses : l'eau, même fraîchement distillée, montre à l'ultramicroscope d'innombrables points brillants ; pour l'en débarrasser, il faut la filtrer à travers des parois de porcelaine ou de collodion et la conserver dans des flacons bouchés avec du papier d'étain, en prenant soin de n'admettre à son contact que de l'air filtré sur du coton. Si l'on vient ensuite à produire au sein du liquide, par précipitation chimique, des particules infiniment petites, les mouvements de convection et les mouvements browniens [1] qui les agitent incessamment en rendent l'observation et, par suite, le dénombrement fort difficiles. La méthode applicable à ce cas est alors la suivante : on dilue la liqueur avec du liquide optiquement vide jusqu'à ce qu'il n'apparaisse plus que quatre ou cinq particules à la fois dans le champ de vision du microscope ; il est possible, en s'y reprenant à un grand nombre de fois et en faisant des

1. Voir le chapitre suivant.

moyennes, de mesurer la distance de deux grains voisins ou, ce qui revient au même, d'évaluer le nombre moyen des particules visibles en même temps dans un volume connu ; la connaissance du titre de la liqueur suffit alors pour déterminer la masse moyenne des particules, et par suite leurs dimensions. Cette méthode, appliquée à des solutions « colloïdales » d'or ou d'argent, a permis de pousser jusqu'à six millimicrons la limite des mesures en milieu liquide.

* * *

La science vient donc d'acquérir un moyen d'observation qui prolonge et complète l'emploi du microscope. Bien qu'entrée de fraîche date dans la technique des laboratoires, l'ultramicroscopie a déjà rendu quelques services aux naturalistes, aux chimistes et aux physiciens. Les premiers sentent, plus vivement que les autres, les inconvénients du microscope qui est leur grand et presque leur unique instrument de travail ; ils rencontrent à chaque instant, dans l'étude des milieux vivants, des organes dont ils ne parviennent pas à analyser la délicatesse : l'ultramicroscope ne répond pas, en général, à

leurs besoins parce que son pouvoir de résolution n'est pas supérieur à celui du microscope. Il y a pourtant des cas où l'éclairage sur fond noir permet de distinguer, dans un organe bien détaché, des détails qui échappent en éclairage direct ; les cils vibratils et, d'une façon générale, tous les organes déliés et formés d'une substance plus réfringente que le liquide ambiant, sont justiciables de la méthode nouvelle ; certains microbes, comme le spirochète de Schaudinn, spécifique de l'avarie, présentent des filaments en tire-bouchon, brillants et ténus, dont les mouvements sont caractéristiques ; d'autres, comme les trop célèbres trypanosomes, reçoivent du flagelle et de la membrane ondulante qui les terminent des impulsions tout à fait typiques ; tous ces détails de structure n'apparaissent nettement que sur le fond noir de l'ultramicroscope, où le Dr Comandon a pu les cinématographier, à raison de trente-deux poses par seconde, rendant ainsi visibles pour tous les scènes de la vie des infiniment petits et les grandes batailles que se livrent, dans nos propres tissus, microbes et globules blancs.

Mais l'ultramicroscope possède, en biologie, un domaine réservé ; c'est l'étude des *microbes ultramicroscopiques*. Ces organismes bien diffé-

renciés par les maladies qu'ils produisent, mais invisibles aux plus forts grossissements, sont nombreux et redoutables; citons ceux de la fièvre aphteuse, de la peste bovine, de la fièvre jaune, de la clavelée, de la rage. Ils ne doivent pas être beaucoup plus petits que les derniers corps visibles en microscopie ordinaire, car ils sont arrêtés par les bougies Chamberland à pâte serrée ; il en est même un, celui de la péripneumonie bovine, qui se trouve tout à fait à la limite de visibilité ; les cultures de ce microbe, faites à l'Institut Pasteur, ne montrent au microscope ordinaire « qu'un fond granulé dont les éléments sont indistincts[1] », et on n'arrive à ce résultat qu'en les colorant, par conséquent en les tuant, tandis qu'à l'ultramicroscope on peut les observer vivants sous formes de petits points brillants, animés de mouvements analogues aux mouvements browniens de la matière non vivante. Ceci n'est qu'un début, et une étude approfondie de ces divers microbes permettra sans doute de les voir et peut-être encore de les différencier par les mouvements qu'ils peuvent tenir d'organes invisibles.

En chimie également, une voie nouvelle s'est

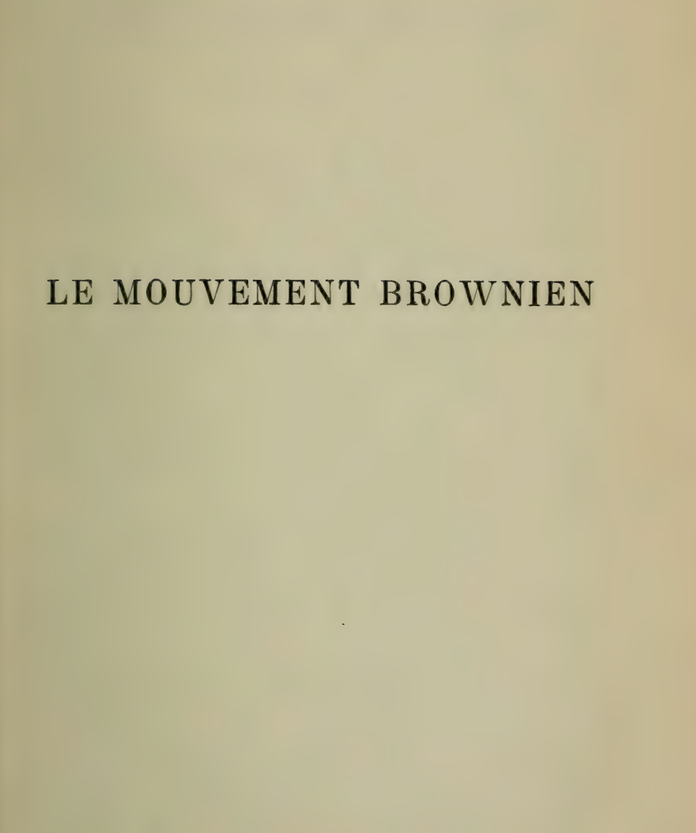
1. Cotton et Mouton, *les Ultramicroscopes* (Masson, éditeur, 1906).

ouverte par l'observation au microscope des réactions qui donnent naissance à des précipités. Lorsqu'on mélange deux liquides susceptibles de réagir et extrêmement dilués, on n'aperçoit à l'œil nu, pendant de longues heures, aucun précipité ni même aucune opalescence de la liqueur ; pourtant la réaction est déjà commencée ; à l'ultramicroscope, on voit apparaître des points brillants dont le nombre augmente d'abord très rapidement pour rester ensuite stationnaire ; l'éclat de ces particules croît peu à peu, même lorsque leur nombre ne change plus, et l'on constate ainsi que la réaction chimique se fait en deux temps ; d'abord par l'apparition brusque, presque explosive, de germes solides dans la liqueur, puis par un dépôt du précipité autour de ces germes qui grossissent peu à peu sans que le nombre en augmente ; mais ces deux périodes sont elles-mêmes précédées par un *temps mort*, pendant lequel les liquides mélangés paraissent inactifs, comme deux athlètes qui se mesurent du regard avant d'entamer la lutte. Il n'est pas difficile d'imaginer ce qui a dû se passer pendant ce temps mort : l'étude de la conductibilité électrique montre que la réaction chimique commence dès l'instant où les deux solutions sont mélangées, et l'on sait, d'autre

part, qu'il n'y a pas de corps rigoureusement insoluble dans un liquide ; il est donc probable que les produits de la réaction ont commencé par se dissoudre jusqu'à saturation, et même jusqu'à sursaturation, état instable dont le moindre choc a troublé le faux équilibre en faisant apparaître brusquement les germes solides.

Ainsi, l'ultramicroscopie nous permet une analyse plus serrée de la réaction chimique ; les services qu'elle a rendus aux physiciens ne sont pas moindres ; un premier, et non le moins important, est d'avoir remis le microscope en honneur dans leurs laboratoires. Beaucoup s'étaient habitués à l'idée que ce merveilleux instrument ne pouvait plus servir qu'aux naturalistes et je sais plus d'un laboratoire de physique, merveilleusement outillé pour tout le reste, où l'on n'aurait trouvé, il y a quelques années, que des tronçons épars de microscopes dont l'antiquité faisait le seul mérite. Le physicien d'aujourd'hui a pris conscience de ce qu'il peut gagner sur la nature par l'emploi de microscopes perfectionnés ; de là est née toute une série de travaux qui font le plus grand honneur à la science, et surtout une étude détaillée des mouvements browniens, grâce à laquelle la théorie cinétique de la matière a

passé de l'état d'hypothèse au rang de certitude scientifique. Ce grand progrès, dû en grande partie aux expériences de M. Perrin, fera l'objet du prochain chapitre.



LE MOUVEMENT BROWNIEN

LE MOUVEMENT BROWNIEN

L'hypothèse atomique décompose la matière en molécules très petites, qui peuvent elles-mêmes se composer d'un assemblage d'atomes, et la théorie cinétique attribue aux molécules des mouvements très rapides, incessamment modifiés par leurs collisions mutuelles. L'hypothèse est aussi vieille que la philosophie, la théorie a presque le même âge que la physique. Toutes deux se sont précisées avec les progrès de la science ; en se moulant sur les faits, elles se sont soudées à eux, si bien que le bloc paraît infrangible. Pourtant, elles ne sont que probables : les molécules et leurs mouvements échappent aux sens et notre époque a vu des hommes éminents affirmer que l'atomisme est une doctrine creuse, que les savants doivent renvoyer aux philosophes. Ceux qui n'ont pas le loisir d'approfondir étaient donc en droit, jusqu'ici, de se demander si tout cela n'est pas

un jeu de l'esprit, qui obscurcit la science au lieu de la clarifier.

Aujourd'hui, cette réserve sceptique n'est plus de mise ; l'étude du mouvement brownien vient d'engager dans la voie expérimentale l'étude directe des mouvements moléculaires. Ce résultat est l'œuvre du jeune professeur à la Sorbonne, M. J. Perrin, à qui de remarquables travaux sur les rayons X avaient déjà conquis une juste notoriété.

En 1827, le naturaliste anglais Brown, examinant au microscope[1] des particules solides en suspension dans un liquide, s'aperçut qu'elles étaient animées d'un mouvement incessant ; le phénomène est aisé à constater quand on dispose d'un bon microscope : il suffit de placer sur la platine de l'appareil, entre une lame de verre et une lamelle couvre-objet, une goutte d'un liquide contenant des grains solides dont le diamètre avoisine le micron (ou millième de millimètre) ; on obtiendra un bon résultat en ajoutant à de l'eau un peu d'encre de Chine, qui contient du noir de fumée sous forme de grains très petits. Parmi ces particules de noir de fumée,

1. Dollond venait d'apporter à cet instrument un perfectionnement considérable, en le munissant d'objectifs achromatiques.

les unes, généralement les plus grosses, tombent au fond de la préparation et s'immobilisent contre les parois ; d'autres, plus petites, suspendues dans le liquide, paraissent animées d'un frémissement continu ; enfin celles qui, plus petites encore, sont aux limites de la visibilité, exécutent des mouvements de plus grande amplitude, incohérents et désordonnés, sautant brusquement à droite, à gauche, immobiles un instant pour repartir de nouveau ; ces déplacements échappent à toute règle et à toute prévision et les mouvements des particules voisines sont complètement indépendants les uns des autres.

L'observation de Brown n'intéressa ni les naturalistes, ni les physiciens : peut-être jugea-t-on inutile de chercher des lois au hasard, en vertu de cette idée préconçue et fausse que le hasard n'a pas de lois ; peut-être les effets observés furent-ils mis au compte de la convection calorifique et des trépidations transmises à travers le liquide. On ne reparla plus du mouvement brownien jusqu'en 1880 ; c'est alors que M. Gouy en fit ressortir l'importance et montra l'inexactitude des explications sommaires dont on s'était contenté. L'agitation brownienne n'est pas due à des trépidations, car elle subsiste la

nuit aussi bien que le jour et n'est pas moins intense en rase campagne qu'auprès d'une rue secouée par de lourds charrois; elle ne tient pas davantage aux mouvements de convection produits dans toute masse fluide par les différences de température, car la convection forme des courants qui entraînent dans un déplacement d'ensemble un grand nombre de particules, alors que le propre du mouvement brownien est l'indépendance absolue du mouvement des particules voisines; d'ailleurs, on ne change rien au phénomène quand on maintient dans la masse fluide un rigoureux équilibre de température. La lumière non plus n'intervient pas, puisqu'on peut rendre l'éclairement mille fois plus faible, ou changer sa couleur, sans rien modifier. Enfin, la nature physique ou chimique des grains n'agit pas davantage; les microbes, les débris minéraux ou organiques de toute sorte qui pullulent dans l'eau ordinaire s'agitent tous de la même manière.

Toutes les hypothèses qu'on pouvait faire à première vue étant ainsi éliminées, une seule reste debout et s'impose : le mouvement des particules solides nous révèle une agitation interne et spontanée du liquide ambiant, comme les déplacements d'un bouchon nous montrent

ceux de l'eau qui le porte. La goutte d'eau que nous regardons au microscope et qui nous paraît immobile, ressemble à ces essaims d'insectes qui, l'été, pullulent au-dessus des étangs ; elle est faite de molécules séparées, dont les masses sont plusieurs millions de fois plus faibles que celles des grains qui manifestent le mouvement brownien ; ces molécules, incessamment agitées, se choquent sans cesse et rebondissent les unes sur les autres ; elles frappent aussi la surface d'un corps immergé dans le liquide ; si ce corps n'est pas extrêmement petit, il recevra en même temps et sur tous les points de sa paroi des millions de chocs dont les actions s'équilibreront mutuellement ; au contraire, les particules plus petites qui manifestent l'agitation brownienne ne sont frappées en même temps que par un petit nombre de molécules et la compensation qui se produisait dans le cas précédent est désormais imparfaite ; une face reçoit plus de chocs que la face opposée et la différence des impulsions projette le corpuscule dans une certaine direction ; l'instant d'après, les chocs autrement répartis produiront un mouvement différent. Ainsi le corpuscule sera incessamment bousculé comme une balle que se renverraient mille lutins, et ses déplacements seront d'autant

plus sensibles qu'il sera plus petit, tant parce que les chocs simultanés s'équilibrent moins exactement que parce que la masse à ébranler est plus faible : de même un cuirassé reste insensible au mouvement des vagues, qui ballotte un navire d'un moindre tonnage. « Ainsi apparaît[1] une propriété profonde, éternelle de ce qu'on nomme un *fluide en équilibre*. Cet équilibre n'existe que de façon moyenne et pour de grandes masses ; c'est un équilibre statistique. En réalité, tout le fluide s'agite indéfiniment et spontanément en des mouvements d'autant plus violents et rapides qu'ils concernent des portions plus petites ; la notion statistique de l'équilibre est complètement illusoire. »

* * *

Cette interprétation n'était, comme la théorie cinétique elle-même, qu'une hypothèse plausible lorsque M. Perrin entreprit d'en faire une vérité physique par l'étude méthodique des mouvements browniens. Une difficulté préliminaire consiste à obtenir des grains de formes et de dimensions bien déterminées ; on l'a résolue en

1. J. Perrin, *Mouvement brownien et réalité moléculaire*.

traitant des émulsions de gomme-gutte ou de mastic. La gomme-gutte, utilisée pour l'aquarelle, provient du latex desséché du guttier de l'Indo-Chine ; en la frottant sous un courant d'eau, on obtient un liquide jaune, qui contient la gomme sous forme de grains sphériques de dimensions variables ; il faut alors procéder au triage de ces grains, de façon à réunir tous ceux qui ont même diamètre. On y parvient par l'emploi méthodique de ces machines nommées *centrifugeuses*, qui servent en laiterie à l'écrémage du lait, ou encore dans de nombreuses industries à séparer dans un liquide mixte des éléments de densité différente ; le mélange est soumis à une rotation rapide, qui entraîne à la périphérie les parties les plus denses, sur lesquelles la force centrifuge est prépondérante.

Lorsqu'on soumet à l'action de ces machines l'émulsion de gomme-gutte à grains irréguliers, on constate que les premières parties séparées sont relativement riches en gros grains ; la teneur s'accroît par une nouvelle centrifugation du produit précédent, si bien qu'en multipliant les opérations, on parvient, par un enrichissement graduel qui rappelle la distillation fractionnée, à obtenir un liquide qui ne contient

qu'une seule catégorie de grains ; la même opération, conduite sur les résidus, fournit une émulsion à particules plus petites, et ainsi de suite, si bien qu'avec de la patience on a séparé un certain nombre d'échantillons, dont chacun renferme des particules identiques.

On peut obtenir des résultats analogues par l'emploi d'une sorte de vernis, nommé mastic, dont la solution alcoolique, versée brusquement dans l'eau, donne un liquide laiteux, c'est-à-dire une émulsion formée, comme celle de gomme-gutte, par des grains sphériques de dimensions très variables. On peut en déterminer le diamètre par plusieurs méthodes qui donnent des résultats concordants ; la plus simple consiste à mesurer au microscope la longueur des bâtonnets qui se forment, de temps en temps, par l'agglomération d'un certain nombre de grains accolés bout à bout.

Cette besogne préalable achevée, prenons une des émulsions simples, dont toutes les particules sont identiques, et versons-la dans l'eau. Comme le mastic et la gomme-gutte sont plus denses que ce liquide, on doit s'attendre à ce qu'ils tombent au fond ; c'est ce qui arriverait pour des grains un peu gros. Mais les lois ordinaires de la physique ne sont pas faites pour

ces masses infiniment petites; lorsqu'on attend plusieurs heures, en maintenant le liquide à température constante de façon à éviter les courants de convection, il s'établit un état d'équilibre qui se maintient ensuite indéfiniment; mais ce n'est qu'un équilibre moyen ou statistique; chaque tranche du liquide renferme toujours le même nombre de globules, et la fixité de leur nombre résulte de la compensation de milliers de mouvements incohérents; de même, une ville a une population fixe parce que le nombre des entrants compense celui des sortants.

Plaçons donc sur le porte-objet du microscope la cellule qui renferme l'émulsion étendue d'eau; on sait que, lorsque le grossissement est fort, la mise au point est extrêmement précise, c'est-à-dire que l'appareil montre seulement une tranche de la préparation dont l'épaisseur n'excède pas un ou deux microns ; dès lors, il est facile, en soulevant le corps du microscope avec une vis micrométrique, de faire défiler devant l'œil toutes les couches superposées dans le liquide depuis le fond du vase jusqu'au niveau supérieur. En opérant ainsi, on constate que tous les granules ne sont pas tombés au fond, mais qu'ils sont de moins en moins serrés à mesure qu'on s'élève, si bien qu'on arrive rapidement à

des couches où les granules sont très raréfiés.

Il importe de ne pas se limiter à cette constatation grossière et de déterminer avec rigueur la loi de répartition en hauteur des grains d'émulsion. L'opération ne va pas sans difficulté, par suite de l'agitation incessante des particules. On peut se tirer d'affaire en faisant des photographies instantanées sur lesquelles les grains peuvent être dénombrés à loisir ; mais ce procédé ne réussit qu'avec les grains de diamètre supérieur à un micron ; pour les autres, il faut recourir à l'artifice suivant : on place à l'intérieur du microscope un écran percé d'un trou très petit, de façon à restreindre considérablement la région visible à travers l'instrument ; alors, au lieu de centaines de points mouvants, on n'en voit plus qu'un nombre très petit, généralement inférieur à cinq, et qu'on peut toujours apprécier du premier coup d'œil ; ce nombre est variable, mais en faisant un grand nombre de visées d'essai, on peut obtenir une valeur moyenne, d'où il est aisé de déduire le nombre de particules qu'on eût compté si le champ entier du microscope avait été visible.

Examinons maintenant les résultats et précisons-les en citant un exemple. Il se rapporte à des grains sphériques de gomme-gutte ayant,

comme diamètre, quatre dixièmes de micron ; ces grains, en suspension dans l'eau, sont placés dans une petite cuve cylindrique en verre, dont le fond, bien horizontal, repose sur la platine porte-objet du microscope ; la hauteur totale du liquide atteint cent microns, c'est-à-dire un dixième de millimètre. Lorsque l'équilibre est atteint, on vise d'abord au microscope une couche située près du fond et on compte, comme nous l'avons dit, les grains contenus dans cette tranche ; supposons qu'on en ait trouvé 100 ; on soulève alors, avec la vis micrométrique, le corps du microscope de façon à viser une couche située à 28 microns au-dessus de la première ; on n'y trouve plus que 50 granules ; visant encore à 28 microns au-dessus, le nombre des grains se réduit à 25, et ainsi de suite.

L'expérience nous met donc en présence d'une loi simple : *chaque fois qu'on s'élève de 28 microns, le nombre des grains diminue de moitié*. D'autres mesures, faites avec des grains de nature et de calibre différents, donnent des résultats identiques, sauf en ce que la hauteur nécessaire pour dédoubler le nombre des grains varie avec le poids apparent[1] de ceux-ci ; si le

1. C'est-à-dire leur poids diminué de celui de l'eau où ils baignent.

poids apparent est double, il ne faudra plus monter de 28 microns, mais seulement de 14, pour diminuer de moitié le nombre des particules.

*
* *

Pour comprendre l'importance de ce résultat, il nous faut maintenant revenir à la théorie cinétique et montrer comment l'expérience de Perrin réalise, avec des molécules plus grosses, une véritable *atmosphère artificielle*. Supposons que l'atmosphère terrestre soit constituée uniquement d'azote, ce qui ne change pas grand chose à ses propriétés physiques, l'oxygène et l'azote ayant sensiblement même densité et les autres corps n'existant dans l'atmosphère qu'à dose réduite. La théorie cinétique nous montre cette masse gazeuse comme constituée de molécules très petites, dont on a pu déterminer le poids : pour en donner une idée, nous dirons qu'il y a autant de molécules dans un gramme d'azote qu'il y a de grammes dans un cube d'eau de 293 kilomètres de côté. De là, on peut déduire le nombre de ces masses élémentaires : dans un millimètre cube d'azote à la température et à la pression ordinaires se pressent 30 millions

de milliards de molécules ; malgré leur nombre, chacune d'elles est si petite, qu'elles sont loin de se toucher ; l'intervalle entre deux molécules représente, en moyenne, 120 fois leur diamètre. Enfin, ces éléments matériels sont animés de mouvements incessants, infiniment variés en grandeur et en direction, et dont la théorie cinétique nous fait connaître la vitesse moyenne, 500 mètres par seconde ; bien entendu, une molécule d'azote ne parcourt pas 500 mètres d'une seule traite, car elle a été, en une seconde, choquée cinq milliards de fois par d'autres molécules et renvoyée dans une direction différente. Telle est donc l'agitation vertigineuse, qui se cache sous le calme apparent d'un gaz en équilibre ; elle nous permet d'en expliquer toutes les propriétés, entre autres la pression qu'il exerce contre les parois qui le limitent : si le mercure du baromètre est soulevé par l'atmosphère à 76 centimètres de hauteur, c'est parce que chaque millimètre carré de sa surface reçoit, en un millionième de seconde, 350 milliards de chocs des molécules d'azote qui viennent y briser leur trajectoire.

Supposons maintenant qu'on s'élève en ballon dans l'atmosphère ; un baromètre emporté dans la nacelle montre que la pression décroît ; à

5.540 mètres[1], la densité de l'air et la pression barométrique ont diminué, l'une et l'autre, de moitié ; cette double variation s'interprète aisément dans la théorie cinétique : dire qu'il y a deux fois moins de gaz, c'est dire que le nombre des molécules est devenu deux fois moindre ; par suite, le nombre de chocs infligés au mercure du baromètre et la pression exercée sur sa surface, auront diminué dans le même rapport.

Si l'on s'élève encore de 5.540 mètres, on constate une nouvelle diminution de moitié dans la densité et dans la pression de l'air. Ainsi, notre atmosphère paraît, comme l'émulsion de gomme-gutte étudiée par M. Perrin, constituée par des particules séparées dont le nombre décroît à mesure qu'on s'élève ; la loi de variation est la même, mais le taux est différent ; 5.540 mètres d'azote jouent le même rôle que 28 microns d'émulsion ; autrement dit, l'atmosphère de gomme-gutte se raréfie 208 millions de fois plus vite que l'atmosphère d'azote, et l'explication de ce fait est simple : il tient à ce que les particules d'émulsion pèsent 208 millions de fois plus que les molécules du gaz.

Retenons cette conséquence, car nous avons

1. En supposant, pour simplifier, que la température reste invariable.

acculé la théorie cinétique jusqu'au point où elle va subir l'épreuve d'une vérification numérique précise ; il faudra en effet que la molécule d'azote soit 208 millions de fois plus légère que le grain d'émulsion sur lequel nous avons expérimenté. Or la théorie cinétique nous donne le poids de la molécule (nous l'avons indiqué tout à l'heure). D'autre part, on peut, d'après la dimension des grains d'émulsion et la densité de la gomme-gutte, calculer le poids apparent de ces grains ; on trouve 8,25 millionièmes de millionième de milligramme. Et maintenant, il n'y a plus qu'à prendre le rapport de ces deux poids ; la division donne précisément 208 millions. La théorie cinétique sort triomphante de l'épreuve.

Le lecteur excusera, je l'espère, ces nombres et ces calculs en faveur de l'importance du résultat. Les expériences de M. Perrin permettent, pour la première fois, de faire toucher du doigt l'accord entre la théorie cinétique et l'expérience sans passer par de longs et difficiles calculs : le rapport du taux de raréfaction dans l'azote et dans l'émulsion, 208 millions, est une donnée expérimentale qui ne comporte aucune hypothèse ; nous constatons qu'il est égal, comme le veut la théorie, au rapport entre le poids des

grains d'émulsion, connu par une mesure directe, et celui des molécules d'azote, donné par la théorie cinétique. Une pareille coïncidence serait, à elle seule, bien extraordinaire ; mais si quelqu'un s'obstinait encore à y voir l'effet d'un hasard, il lui faudrait expliquer comment elle s'est reproduite six fois de suite, dans six séries de mesures faites avec le mastic et avec la gomme-gutte, en employant des grains dont le poids apparent a varié de un à quarante. Avant les expériences de Perrin, nul n'aurait pu affirmer que les grains d'émulsion ne finiraient pas par tomber tous au fond du vase ; nul n'aurait pu affirmer non plus qu'ils ne resteraient pas suspendus uniformément dans le liquide ; entre ces deux résultats contraires, la loi de répartition des globules se trouve être exactement celle qu'exige la théorie cinétique : on ne saurait exiger une confirmation plus probante.

Ainsi, ce problème qui tient tant de place dans la science et dans la philosophie de la nature, s'est trouvé résolu de la manière la plus inattendue ; au lieu de construire des microscopes assez puissants pour montrer l'essaim en mouvement des molécules, on a, pour ainsi dire, grossi les molécules elles-mêmes jusqu'au point de les rendre visibles, car le grain de

gomme-gutte ou de mastic, éternellement agité par le mouvement brownien, n'est qu'une molécule comme les autres ; mais le corps formé par ces grains, au lieu d'avoir pour poids moléculaire 2, comme l'hydrogène, ou 28, comme l'azote, se comporte comme un gaz dont le poids moléculaire vaudrait six milliards.

Il faut remarquer, d'ailleurs, que si la molécule de gomme-gutte est visible, tandis que celle de l'azote échappe à notre observation, cela tient, non seulement à l'écart des dimensions mais encore à la différence des vitesses. La première ne se déplace que de quelques microns par minute ; nous avons vu que la théorie cinétique assigne à la seconde une vitesse moyenne de 500 mètres par seconde, comparable à celle d'une balle qui sort du fusil ; et l'observation au microscope aurait pour effet d'amplifier encore cette vitesse dans un rapport égal au grossissement de l'instrument.

Les expériences de M. Perrin ont mis hors de doute l'exactitude de la théorie cinétique ; mais elles présentent encore un autre intérêt en nous fournissant la méthode la plus précise et la plus sûre pour évaluer les grandeurs moléculaires ; ces grandeurs n'étaient connues jusqu'ici qu'avec une médiocre précision. Pour en donner une

idée, faisons choix d'une unité de poids assez petite pour que la masse de la molécule d'azote ne s'exprime pas par une fraction contenant un nombre exorbitant de zéros : ce sera le *millième de milliardième de milliardième de milligramme*. Les mesures tirées de l'étude de la viscosité et des propriétés électriques des gaz avaient montré que la molécule d'azote pesait plus de 14 fois et moins de 62 fois notre unité ; l'étude de la diffusion avait conduit à des nombres compris entre 21 et 70 ; la mobilité des ions donnait de 18 à 46, la diffusion atmosphérique de la lumière solaire, de 18 à 93 ; la transformation du radium en hélium conduisait au nombre 40 ; enfin, des lois du rayonnement des corps chauds on avait pu déduire des nombres compris entre 35 et 46.

C'est déjà une concordance bien remarquable que celle de ces résultats obtenus par des voies si différentes ; il semble que tous les phénomènes de la physique viennent tour à tour attester la réalité de l'hypothèse atomique ; mais ces nombres laissent flotter une large incertitude sur la valeur exacte de la masse moléculaire de l'azote. Or, l'étude des émulsions fournit une nouvelle mesure de cette constante ; elle donne son rapport à la masse des grains de gomme-

gutte ou de mastic, soit 208 millions dans l'exemple que nous avons cité ; il suffit donc de mesurer le poids apparent de chaque grain d'émulsion et de déterminer la loi de répartition des grains dans l'émulsion, suivant la hauteur ; or chacune de ces mesures est susceptible d'une précision presque illimitée ; M. Perrin, dans sa série la plus soignée d'expériences, a établi ses moyennes par l'observation de dix mille grains ; le nombre obtenu, 39,7, est bien d'accord avec ceux que nous avons donnés ci-dessus, mais il est beaucoup plus précis ; on peut garantir son exactitude à une unité près ; le jour où l'on aura la persévérance de dénombrer cent mille grains, on aura une précision décuple, c'est-à-dire que la molécule d'azote sera connue avec une erreur moindre qu'un quatre centième de sa valeur. Une telle précision, obtenue dans la mesure d'une grandeur si extraordinairement petite, n'est-elle pas une des choses les plus merveilleuses de la physique ! Et qu'aurait pensé Voltaire de ce résultat, lui qui accusait déjà les physiciens de son temps de « peser des œufs de mouche dans des balances en toile d'araignée » ?

Le mouvement brownien n'est pas limité aux

particules les plus petites qu'on puisse observer au microscope; avec un peu de soin et de patience, on peut le retrouver dans des corps beaucoup plus gros. M. Perrin a pu préparer des grains sphériques de gomme-gutte ou de mastic, de diamètre compris entre dix et cinquante microns, en faisant arriver lentement, au moyen d'un entonnoir à pointe effilée, de l'eau pure dans une solution alcoolique de ces substances; les globules de résine se forment dans la zone trouble qui sépare les deux liquides ; et il suffit, pour les classer par ordre de calibre, de les jeter dans un bac plein d'eau, où ils tombent d'autant plus vite qu'ils sont plus gros.

Il ne saurait plus être question de mettre ces particules en suspension dans l'eau, puisqu'elles tomberaient de suite au fond et s'immobiliseraient contre les parois, mais on peut les placer dans une solution d'urée, ayant même densité qu'elles, où elles flottent librement ; on peut alors suivre au microscope leurs déplacements et constater que ces mouvements obéissent aux lois posées par la théorie cinétique. En voici un exemple : les molécules ne possèdent pas seulement des mouvements de translation, auxquels correspond une certaine énergie moyenne de

translation ; par suite des chocs, généralement obliques, qu'elles s'infligent mutuellement, elles doivent tourner sur elles-mêmes et l'ensemble de ces rotations, infiniment variées, donne à la masse gazeuse une certaine énergie moyenne ; or l'analyse mathématique du phénomène, effectuée par Einstein et d'autres mathématiciens éminents, a conduit à conclure que ces deux énergies de rotation et de translation devaient être égales. Voilà une conclusion, fort importante pour la théorie cinétique, mais qui ne s'impose pas avec une certitude absolue, car elle n'apparaît qu'après de longs calculs où se glissent nécessairement des hypothèses. Pourtant elle est exacte, et l'étude des grosses sphères de mastic suspendues dans la solution d'urée en a fourni la preuve ; en suivant au microscope les déplacements des particules, on peut évaluer la valeur moyenne de leur énergie de translation ; de même à la faveur d'irrégularités de leur structure, on a pu en étudier le mouvement de rotation et en déduire l'énergie moyenne correspondante ; or l'égalité de ces deux grandeurs s'est trouvée vérifiée à quelques centièmes près.

On est fondé, d'après cela, à affirmer que l'agitation moléculaire agit sur tous les corps. Ainsi, le calcul indique qu'une bille d'acier d'un

millimètre de diamètre, plongée dans l'eau, éprouve, par suite des chocs moléculaires, des déplacements dont l'amplitude est voisine d'un micron par seconde ; de tels mouvements ne paraissent pas inaccessibles aux procédés d'observation délicats dont on dispose actuellement ; ajoutons que le calcul ne donne qu'une valeur moyenne, et qu'il peut se produire des déplacements beaucoup plus grands, voire même visibles à l'œil nu ; mais ils seront d'autant plus rares qu'ils seront plus différents de la valeur de moyenne ; il est possible qu'un déplacement visible à l'œil nu ne se produise qu'une fois dans un million d'années ; il faudra, pour l'obtenir, que le hasard, qui fait sortir tour à tour toutes les combinaisons, ait coordonné les chocs moléculaires de telle façon qu'ils se produisent presque tous d'un seul côté de la bille. Ainsi, on nous dirait qu'une bille d'acier, au repos dans une assiette, a été vue sautant en l'air, brusquement et sans l'intervention d'aucune cause extérieure, que nous n'aurions pas à crier au miracle ; c'est au contraire un phénomène qui se produira nécessairement, un jour ou l'autre ; celui qui l'observera n'aura pas besoin, pour l'expliquer, de penser aux phénomènes de lévitation ni aux forces psychiques.

Mais tous ces résultats, pour bien établis qu'ils soient, soulèvent à leur tour de nouvelles difficultés ; la science ne résoud un problème qu'en en posant de nouveaux. L'agitation moléculaire est spontanée et éternelle ; on connaît des cristaux de quartz dont l'intérieur est creusé de cavités très petites, sortes de cristaux en creux, remplis d'acide carbonique liquide ; au sein du liquide, on distingue au microscope une petite bulle gazeuse, sans cesse remuée par le mouvement brownien : voilà donc une agitation qui dure depuis que cette bulle a été enfermée dans sa prison de quartz, sans doute depuis des millions d'années. De même, dans le monde de l'infiniment grand, les astres ne connaissent pas le repos et notre esprit peut admettre, sans absurdité, que leurs évolutions continueront éternellement. La nature nous présente donc, dans ses éléments les plus petits comme dans les plus grands, le mouvement perpétuel, dont la vaine recherche n'occupe plus aujourd'hui que les cerveaux malades. Comment donc concilier tout cela, et expliquer que la loi du monde des atomes et du monde des astres cesse de s'appliquer aux milieux intermédiaires ?

Le physicien peut toujours se dérober en déclarant que les mots « éternel » et « perpétuel »

n'ont aucun sens dans les sciences d'observation ; mais de grands esprits n'ont pas employé ce détour. Maxwell imagine un récipient plein de gaz et séparé en deux compartiments A et B par une cloison percée d'un trou juste assez grand pour laisser passer une molécule ; un démon très agile ouvre et ferme ce trou à l'aide d'une trappe de façon à laisser passer toutes les molécules qui vont de A vers B et à interdire le passage à celles qui vont en sens inverse ; ainsi, par le seul jeu d'un mécanisme intérieur qui ne consomme aucun travail si la trappe est parfaitement mobile, les molécules s'accumulent dans B et se raréfient dans A ; on peut utiliser la différence de pression qui en résulte pour déplacer un piston dans un cylindre et produire gratuitement du travail.

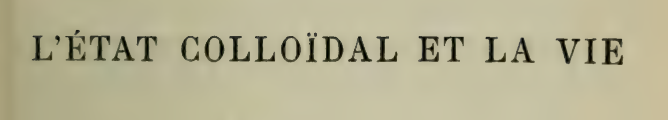
Le démon de Maxwell a le tort de ne pas exister, mais l'étude du mouvement brownien montre que sa présence n'est pas indispensable : une petite paroi très mobile plongée dans un fluide reçoit des molécules ambiantes des chocs qui ne s'équilibrent jamais rigoureusement, de sorte qu'elle oscille autour de sa position moyenne ; on ne voit pas ce qui empêcherait, *théoriquement*, d'employer ces déplacements pour effectuer un travail mécanique comme on a utilisé, en Californie, l'agitation incessante de la mer à l'aide

de flotteurs reliés à un mécanisme approprié ; on ne voit pas non plus pour quelle raison, autre que l'usure inévitable, l'appareil cesserait jamais de fonctionner ; tout ce qu'on peut dire avec M. Perrin, c'est qu'il serait imprudent de compter sur le mouvement brownien pour élever les pierres destinées à bâtir une maison.

L'impossibilité du mouvement perpétuel subsiste pourtant comme *vérité pratique* : nous ne pouvons réaliser aucune machine capable de marcher indéfiniment sans emprunter de l'énergie à l'extérieur, parce que nous sommes hors d'état d'obtenir ce que la nature a pourtant réalisé dans le monde des atomes et dans celui des astres : un mouvement qui ne soit usé par aucun frottement ; et, d'autre part, nous n'entrevoyons aucun moyen pratique de capter les énergies, pourtant énormes, des mouvements atomiques[1] ; les inventeurs agiront donc sagement en ne s'acharnant pas à résoudre un problème qui ne leur apportera que des déboires.

1. On a cru un moment que la chaleur dégagée par le radium provenait de l'énergie captée dans le milieu ambiant et que le radium réalisait ainsi le problème du mouvement perpétuel, puisque cette chaleur pouvait, à son tour, être utilisée pour produire du mouvement ; mais on sait aujourd'hui que cette émission calorifique n'est pas éternelle et qu'elle est liée à la désintégration du radium, c'est-à-dire à sa transformation en émanation, puis en hélium.

Il n'en est pas moins vrai que l'impossibilité du mouvement perpétuel est déchue du rang de vérité absolue où notre science imparfaite l'avait élevé ; elle a eu le sort de beaucoup d'autres principes, proclamés à grand fracas comme les assises immuables de la raison et qui ne sont que des règles empiriques, un peu plus générales que les autres, applicables à la petite partie du monde que nous connaissons.


L'ÉTAT COLLOÏDAL ET LA VIE

L'ÉTAT COLLOIDAL ET LA VIE

Dans un vase que divise en deux compartiments une cloison de parchemin, versez d'un côté de l'eau pure et de l'autre un liquide extrait des milieux vivants, sécrétion animale, jus de plante ou de fruit. Parmi les produits contenus dans ce liquide, les uns passent, à travers la cloison, dans l'eau où ils se dissolvent ; les autres restent sur place. Au bout de quelques jours, la séparation est achevée. L'eau s'est chargée d'une série de composés chimiques, qui, tous, sont bien définis, de composition fixe et capable de cristalliser : de là le nom générique de *cristalloïdes*, sous lequel ils ont été désignés, il y a plus d'un demi-siècle, par le chimiste anglais Graham, inventeur du procédé. De l'autre côté du parchemin, sont restés les *colloïdes*, corps complexes, mal définis, incristallisables.

Cette méthode de *dyalise*, apparue à l'aurore de la chimie organique, obtint un vif succès parce

qu'elle fournissait aux chimistes un moyen expéditif pour extraire d'un milieu vivant les corps capables de les intéresser ; quant aux colloïdes, comme on était hors d'état de les séparer et de les soumettre aux méthodes de la chimie minérale, il n'y avait qu'à les jeter. Seul Graham, plus perspicace, eut l'idée de regarder de près ces corps si dédaignés, et c'est à lui que nous devons les premières notions sur leurs propriétés et leur structure.

Aujourd'hui, les produits chimiquement définis, préparés dans le « laboratoire de la nature », sont presque tous catalogués et étudiés ; leur nombre, en y ajoutant leurs dérivés, dépasse certainement cinquante mille ; la moisson n'est pas loin d'être achevée. Le moment est venu de regarder, comme Graham, de l'autre côté de la cloison et d'étudier, avec tous les moyens dont dispose la science moderne, ces mystérieux colloïdes qui paraissent être les agents effectifs de la vie, tandis que les cristalloïdes n'en sont que les déchets ou les aliments. La tâche est pleine de difficultés ; c'est pourquoi les résultats acquis par un demi-siècle d'efforts tiennent dans le creux de la main ; ils valent pourtant d'être connus.

*
* *

On peut d'abord se rendre compte que la membrane du parchemin dyaliseur joue, en gros, le rôle physique d'un crible qui, laissant passer les molécules, arrête les agrégats de plus grande dimension; les uns comme les autres sont mobiles au sein du liquide; l'étude du mouvement brownien les montre en proie à une agitation incessante, de sorte que, si rien ne les arrête, ils se répandent uniformément dans tout le liquide; c'est la propriété qu'on désigne sous le nom de *diffusion*.

Mais les molécules sont les plus petites et les plus agiles; elles diffusent rapidement, tandis que les agrégats plus lourds se déplacent avec lenteur. Des ablettes, dans un vivier séparé en deux compartiments par une toile métallique à larges mailles, se répandront uniformément dans toute l'étendue du bassin; de gros poissons restent dans le compartiment où on les a introduits. De même, les agrégats, qui sont des milliers de fois plus gros que les molécules, ne franchissent pas la membrane du dyaliseur parce qu'ils n'arrivent pas à se faufiler par les trous dont elle est percée. En tout cas, la lenteur de leur

diffusion n'en laisse passer qu'un petit nombre, tandis que les molécules y cheminent aussi aisément qu'une souris par une porte cochère. Si donc le second récipient du dyaliseur a de grandes dimensions ou, ce qui revient au même, si on y renouvelle l'eau à plusieurs reprises, toutes les molécules franchiront la cloison et le premier compartiment ne contiendra plus que les colloïdes.

On se trouve alors en présence d'un produit complexe qu'on souhaiterait de séparer en ses divers éléments, afin d'étudier chacun d'eux. Mais l'opération n'est pas simple, et il n'est même pas certain qu'elle ait un sens. Rien ne nous prouve que les colloïdes, même les plus homogènes, en apparence, comme l'albumine, soient des espèces chimiquement définies. Il existe un nombre infini d'albumines, dont les formules chimiques et les propriétés oscillent autour d'une valeur moyenne : le blanc de l'œuf de poule n'a pas exactement les mêmes propriétés que celui de l'œuf de canard et il n'est même pas dit que deux œufs de poule fournissent des produits identiques. Inversement, la même composition chimique approximative $C^6H^{10}O^5$ appartient à des colloïdes qu'il est impossible de confondre, comme la caséine, la gélatine et l'al-

bumine. Il est impossible d'engager un colloïde dans une combinaison chimique qui permette de l'isoler et d'où l'on puisse ensuite le retirer à l'état pur. Ainsi la chimie ne nous permet, ni de définir un colloïde, ni de le séparer des autres corps de même nature avec lesquels il peut se trouver mélangé.

Force nous est donc d'envisager le problème par son côté physique. Le colloïde est, pour nous, formé d'agrégats de molécules, qu'on désigne sous le nom de *granules*, et qui sont en suspension dans un liquide. Parmi ces agrégats, il en est de relativement gros, dont le diamètre, avoisinant le micron (ou millième de millimètre), permet l'observation directe au microscope ; d'autres sont plus petits et ne peuvent être distingués que par l'éclairage latéral de l'ultramicroscopie ; il en est enfin dont le diamètre est inférieur à quelques millimicrons et qui échappent à toute observation ; on les appelle pour cette raison *amicroscopiques ;* pourtant, leur existence est certaine, puisque les liquides qui les contiennent jouissent des mêmes propriétés générales que les colloïdes bien définis.

La plus visible de ces propriétés résulte directement de la structure granulaire des milieux colloïdaux : c'est de diffuser la lumière. Un rayon

lumineux, qui traverse un liquide pur n'éprouve aucune dissémination latérale ; aussi n'est-il visible que si on place l'œil dans son prolongement. Un liquide qui renferme en abondance des grains très petits, devient opalescent ; le rayon lumineux est diffusé, chemin faisant, dans toutes les directions. Avec des granules excessivement petits, cette diffusion agissant plus fortement sur les rayons bleus que sur les rayons rouges, l'œil reçoit une lumière jaunâtre ou orangée, lorsqu'il se place dans la direction de la lumière incidente, nuancée de bleu ou de vert, lorsqu'il observe latéralement. Ce phénomène, dont l'explication est due à Tyndall et à Lord Rayleigh, permet, d'après la nature de la lumière diffusée, d'évaluer la dimension des grains qui produisent l'opalescence.

En même temps, la lumière rejetée latéralement subit une autre modification : elle est *polarisée*, c'est-à-dire qu'elle vibre dans un plan bien déterminé, tandis que les vibrations de la lumière naturelle sont orientées dans tous les azimuths.

Nous sommes ainsi en possession d'un double caractère, qui nous permet de reconnaître dans un liquide l'existence de particules très petites ; ce procédé s'applique aux colloïdes ; tous, même

ceux qui ne laissent rien voir à l'ultramicroscopie, possèdent l'opalescence et polarisent la lumière diffusée latéralement.

Bien que la chimie nous refuse tout moyen d'action sur ces milieux à structure granulaire, nous ne sommes pourtant pas complètement désarmés. Après avoir éliminé par dyalise tous les éléments cristallisables, on peut étendre le colloïde par addition de divers liquides. On peut inversement éliminer une partie du liquide intergranulaire, soit par filtration à travers une bougie de porcelaine à pâte serrée, soit par évaporation, soit, ce qui est beaucoup plus pratique, par filtration à travers une membrane de collodion. Mais cette soustraction de liquide ne peut pas être poussée trop loin sans produire dans le colloïde une altération profonde et définitive, dont nous parlerons tout à l'heure, et qui est la coagulation.

Il y aurait bien un troisième mode d'action, qui n'a pas été employé jusqu'ici d'une manière systématique, et qui permettrait peut-être, avec de la patience, d'isoler les éléments d'un colloïde complexe : la centrifugation. On a déjà observé qu'en soumettant des colloïdes à un mouvement de rotation rapide et prolongée, l'action de la force centrifuge accumule à la périphérie les

grains les plus gros. Il faudrait en somme appliquer le procédé dejà utilisé par M. Perrin pour classer les grains de mastic ou de gomme-gutte. Mais comme les granules sont beaucoup plus petits que les grains d'émulsion, l'opération serait plus longue et plus délicate. Menée à bien, elle fournirait un colloïde homogène, c'est-à-dire à granules identiques. Il serait possible alors, en étudiant à différents niveaux la concentration en granule, d'en déduire le poids moléculaire. Mais rien de tout cela n'a été fait.

Il existe pourtant un moyen de tourner la difficulté et de préparer de toutes pièces, avec des matériaux bien définis, des colloïdes de synthèse qui présentent toutes les propriétés des colloïdes naturels. Cette importante découverte est encore due à Graham.

Si on mélange, dans le vase intérieur du dyaliseur, deux solutions étendues, l'une de silicate de soude, l'autre d'acide chlorhydrique, leur réaction donne du chlorure de sodium, ou sel marin, et de la silice hydratée. Le sel marin s'élimine peu à peu, ainsi que l'excès d'acide chlorhydrique, à travers la membrane de parchemin ; la silice reste seule dans le vase intérieur, en suspension dans le liquide sous forme

d'agrégats séparés, semblables aux granules : l'ensemble forme un liquide légèrement visqueux et opalin ; c'est la silice colloïdale.

La méthode peut être généralisée. Elle réussit pour les acides stannique ou tungstique ; on a obtenu, de même, à l'état colloïdal, des oxydes de fer, d'aluminium, de chrome, etc., des sulfures, des sels, sulfates, chromates, ferrocyanures. Bien entendu, le liquide doit être tel que le granule y soit insoluble ; ainsi, le sel marin peut être obtenu en suspension colloïdale dans la benzine ou le toluène ; mais il ne peut exister dans l'eau qu'à l'état de véritable dissolution.

Aussitôt qu'on eut réalisé des colloïdes artificiels, on s'empressa de les étudier chimiquement, dans l'espoir que leur formule donnerait la clef de leurs curieuses propriétés. Là encore, on a rencontré l'inextricable. Le granule d'oxyde de fer colloïdal aurait pour formule :

$$Fe^{600}\ O^{448,5}\ (OH)^{897}\ Cl^{6}\ 6HCl.$$

Celui du ferrocyanure de cuivre colloïdal pourrait être représenté par diverses formules dont la plus simple est :

$$(Fe\ CAz)^{379}\ Cu^{715}\ K^{80}.$$

Il n'y a rien à tirer de pareils algorithmes,

qui d'ailleurs ne sont qu'approximatifs. Pas plus que le colloïde naturel, le colloïde artificiel n'est un produit chimiquement défini ; tous ces produits n'ont pas une propriété chimique en commun. En revanche, l'état colloïdal est un état physique bien défini, c'est-à-dire une forme d'équilibre sous laquelle tous les corps sont susceptibles d'apparaître, quelle que soit leur composition. Ce qui le prouve mieux encore, c'est que les corps simples eux-mêmes peuvent être amenés à cette forme.

On sait depuis longtemps que, lorsqu'un sel d'or est traité par un réducteur à action lente, comme une solution de phosphore dans l'éther, le métal libre reste en suspension dans la liqueur, qu'il colore des nuances les plus variées, rose, pourpre, violette, suivant la grosseur et peut-être la forme des particules métalliques. Cette propriété avait été utilisée depuis longtemps pour la préparation des laques, qui ne sont que des colloïdes coagulés. Mais un procédé infiniment plus simple a été imaginé, il y a quelque vingt années, par Bredig. Si on fait jaillir un arc électrique entre deux fils d'argent plongés dans de l'eau refroidie extérieurement par de la glace, on voit se former autour du fil négatif un nuage de particules métalliques qui se répandent dans

le liquide en le colorant. Ce liquide, abandonné à lui-même pendant plusieurs jours, laisse d'abord déposer les particules les plus grosses : il se conserve ensuite indéfiniment sans altération. Sa couleur varie du jaune au vert olive ou au rouge brun. Observé à l'ultramicroscope, il paraît rempli par une multitude de grains séparés qu'agite vivement le mouvement brownien et dont les dimensions sont voisines de cinquante millimicrons (ou millionièmes de millimètre). Ces grains sont bien de l'argent, comme on peut s'en assurer en desséchant la liqueur et en faisant l'analyse du résidu.

La méthode de Bredig s'applique à presque tous les métaux et à quelques métalloïdes. En changeant la nature du liquide dans lequel se fait la pulvérisation, en substituant à l'eau divers alcools, l'éther, le pétrole, on obtient des centaines de colloïdes de synthèse, dans lesquels l'état colloïdal apparaît avec une simplicité schématique. Or tous ces corps, si dissemblables chimiquement, ont pourtant un ensemble de propriétés communes ; la biologie et la médecine viennent nous en apporter des preuves imprévues.

Bredig a constaté que les métaux pulvérisés possèdent les propriétés générales des diastases,

qui sont, elles aussi, des colloïdes : elles peuvent, à dose infinitésimale, déterminer certaines réactions, comme la décomposition de l'eau oxygénée. Or, à ce point de vue, elles sont toutes équivalentes ; peu importe qu'on emploie de l'argent ou du platine ; c'est toujours l'état colloïdal qui agit. De même encore, on sait que la médecine utilise avec succès, dans certaines affections graves, l'argent colloïdal en injections hypodermiques. Ce remède a pris, sous les noms de collargol et d'électrargol, une vogue qui paraît justifiée. Or, l'expérience montre que la nature du métal injecté importe peu : là encore, ce n'est pas l'agent chimique, c'est l'état physique qui intervient et qui donne une poussée favorable à l'organisme malade.

*
* *

L'état colloïdal est, comme les états liquide, gazeux et solide, une forme générale d'équilibre de la matière ; mais la définition que nous en avons donnée est insuffisante, puisqu'elle revient à définir le colloïde par les granules et les granules par le colloïde. Il nous faut préciser en indiquant un groupe de propriétés qui s'appliquent au seul défini.

La première et la plus frappante de ces propriétés est la *coagulation*. Un milieu colloïdal peut exister sous deux états différents, que Graham désigne par les noms de *sol* et de *gel*. Un sol n'est pas tout à fait un liquide, puisqu'il contient des granules solides ; mais il en a les propriétés d'ensemble. Un gel n'est pas non plus un solide parfait, c'est une sorte de gelée, plus ou moins consistante suivant la proportion des granules au liquide.

Le passage du sol au gel peut se faire sous l'action de causes très diverses ; le plus souvent, la chaleur seule suffit. C'est elle qui transforme, entre 55 et 75 degrés, l'albumine en blanc d'œuf, et cela sans réaction chimique appréciable à l'analyse ; de même, c'est en chauffant le latex colloïdal de certaines lianes qu'on obtient la forme coagulée, qui est le caoutchouc. D'autres fois, l'agent efficace est une diastase, comme la présure, qui coagule, dans le lait, deux cent cinquante mille fois son poids de caséine. D'autres fois encore le coagulant est l'alcool, ou des sels, des acides ou des bases ; et ici nous apercevons le principe d'une méthode qui permettra peut-être de dissocier un colloïde complexe en constituants plus simples, comme on sépare, en les refroidissant, des mélanges dont les élé-

ments ont des points de congélation différents.

Toutefois, il y a une grande différence entre la gélification d'un colloïde et les changements d'état qu'on étudie en physique. Ceux-ci sont *réversibles,* c'est-à-dire que le corps solidifié par refroidissement se liquéfie de nouveau quand on le réchauffe. Un sol coagulé l'est définitivement ; il ne peut plus être ramené, par la voie inverse, à son état primitif.

Les physiciens ont cherché, comme il était naturel, à étudier le mécanisme de la coagulation par l'observation ultramicroscopique. Voici comment MM. Cotton et Mouton décrivent les apparences observées avec l'argent de Bredig :

Si on fait diffuser lentement dans ce corps une petite quantité d'une solution d'alun, on voit peu à peu, à l'ultramicroscope, l'aspect du liquide se modifier. Au lieu de points isolés, absolument indépendants, on y voit, au début, des groupes, composés seulement de deux ou trois points qui sont évidemment solidaires les uns des autres. Si l'on attend quelque temps, le nombre des amas ainsi formés va en augmentant en même temps qu'il se forme des groupes composés d'éléments plus nombreux, ou des sortes de chapelets. Quand on observe avec un peu de patience, on peut même saisir directement l'instant où un grain vient se fixer sur un amas déjà formé, dont il fera désormais partie.

De plus, les grains réunis dans l'amas floconneux du coagulum ne se touchent pas et conser-

vent, au moins au début, une certaine indépendance, comme on peut s'en rendre compte par les mouvements browniens qui persistent encore, bien qu'affaiblis, et qui ne sont pas identiques pour les différents grains. Ces observations ne nous apprennent rien sur la cause qui détermine la coagulation. Mais nous allons trouver au moins un embryon d'explication dans l'étude d'une autre propriété des colloïdes, tout aussi caractéristique quoique moins apparente : le *transport électrique*.

Les colloïdes, lorsqu'ils sont bien dépouillés de tous les sels dissous, ne conduisent pas l'électricité à la manière des solutions salines qui s'électrolysent, c'est-à-dire se décomposent. Sur le porte-objet du microscope, adapté à l'observation ultramicroscopique, plaçons une petite cuve de verre remplie du colloïde à étudier, aux extrémités de laquelle aboutissent deux lames de platine reliées à des prises de courant. En observant les points brillants que forment les granules, on les voit, dès que le circuit électrique est fermé, se mettre en marche et traverser rapidement le champ de vision ; tous passent dans le même sens, avec des vitesses peu différentes ; vient-on à inverser les pôles du générateur électrique, le sens du mouvement se renverse éga-

lement; on peut même, sans plus de difficultés, opérer avec du courant alternatif; on voit alors les granules, vibrant synchroniquement avec le courant, exécuter les mouvements rapides de va-et-vient suivant les trajectoires parallèles. Ces déplacements n'affectent que des granules, et la masse du liquide reste immobile. Enfin, quand on opère avec des colloïdes bien homogènes, le phénomène est assez régulier pour qu'on puisse le soumettre à des mesures. En étudiant ainsi le transport électrique qu'ils avaient découvert, Linder et Picton constatèrent, en 1893, qu'il est absolument général, mais qu'il se produit, pour certains colloïdes, vers le pôle + ou anode, et pour les autres, vers le pôle — ou cathode.

Tous ces faits comportent une explication très simple ; ils nous apprennent que les granules ne sont pas électriquement neutres, comme les grains de poussière ordinaire, mais qu'ils portent avec eux des charges électriques. Ceux dont la charge est positive, repoussés par le pôle + et attirés par le pôle —, se déplacent de l'anode vers la cathode. Tel est le cas des colloïdes « positifs », qui comprennent, outre les oxydes hydratés de fer et d'alumine, l'oxyhémoglobine, le violet et le bleu de méthyle, le rouge de Magdala, la mucine. Inversement, les granules des

colloïdes « négatifs », chargés négativement, se transportent de la cathode vers l'anode; à ce second groupe appartiennent la plupart des métaux colloïdaux, la silice, beaucoup de sels minéraux, l'amidon, l'albumine, la dextrine, le glycogène, la gélatine et les gommes.

Cette existence de charges électriques attachées à chaque granule, comporte un corollaire nécessaire. En effet, le colloïde, pris dans son ensemble, est électriquement neutre, c'est-à-dire qu'il ne révèle aucune trace d'électrisation. Il faut donc que les charges électriques des granules soient exactement compensées par des charges, égales et de signe contraire, contenues dans le liquide intergranulaire. On a de fortes raisons de penser que les charges compensatrices sont localisées au voisinage immédiat des granules. Nous devons donc nous représenter une particule d'argent Bredig, avec sa charge électrique négative, comme entourée d'une couche électrique positive qui la neutralise, sans être liée au granule ; de même, un navire qui se déplace emporte avec lui sa charge matérielle, égalisée à chaque instant par la poussée de l'eau qui l'entoure, sans que ce liquide participe à son mouvement. L'ensemble du granule électrisé et de la couche électrique compensatrice

porte le nom de *micelle*, jadis proposé par Nægeli.

Tout nous prouve que les micelles ont une structure très compliquée, que nous commençons à peine à connaître. Le peu que nous savons nous permettra toutefois d'éclairer, d'une lumière à la vérité bien vacillante et bien faible, le phénomène de la coagulation. Les expériences les plus typiques à ce sujet sont dues au physicien américain Hardy.

Hardy prit un colloïde négatif, l'alcali-globuline du sérum de bœuf, et la soumit aux rayons α du bromure de radium, qui transportent, comme on sait, des charges électriques positives. Au bout de quelques minutes, la coagulation était réalisée, tandis qu'un colloïde de nature très voisine, mais positif, soumis au même rayonnement, n'était pas coagulé et paraissait même devenir plus limpide. On peut interpréter l'expérience en disant que le colloïde se coagule lorsque ses granules sont déchargés. Cette explication, encore hypothétique, a été confirmée par une expérience complémentaire de M. Victor Henry, qui a réussi à coaguler des colloïdes positifs, oxyde de fer hydraté, rouge de Magdala, violet de méthyle, par les rayons β du radium; ces rayons, à l'inverse des rayons α, transpor-

tent des charges électriques négatives ; des colloïdes négatifs exposés aux mêmes radiations ont conservé toute leur limpidité.

Nous voici donc en possession d'une idée directrice ; elle peut être incomplète, elle l'est même certainement ; pourtant elle nous explique d'autres cas de coagulation. Ainsi, c'est un fait d'expérience que, si on mélange deux colloïdes de signes différents, ils se coagulent réciproquement, tandis qu'il n'y a jamais coagulation lorsqu'on mêle deux colloïdes de même signe.

Autre phénomène : on a constaté que les colloïdes négatifs sont coagulés par les acides ; les bases, au contraire, les stabilisent, c'est-à-dire rendent leur gélification plus difficile. Le contraire arrive pour les colloïdes positifs, qui sont coagulés par les bases et stabilisés par les acides. Puisque tous les acides agissent de même, et aussi toutes les bases, nous sommes amenés à nous demander ce qu'il y a de commun dans chacun de ces types chimiques et à attribuer à ce terme commun l'action coagulante.

Dans tous les acides, l'élément commun est l'hydrogène H, qui apparaît, dans tous les phénomènes d'électrolyse, comme lié à une charge positive, puisqu'il se transporte sur la cathode. Dans les bases, au contraire, apparaît le grou-

pement OH, qui est lié d'une façon analogue à une charge électrique négative. Dès lors, tout s'explique naturellement : les acides coagulent les colloïdes négatifs, en leur apportant des charges positives, capables de neutraliser les granules ; les bases, au contraire, en renforçant la charge positive du colloïde, ne peuvent que le rendre plus stable, puisqu'elles accroissent la charge négative nécessaire pour réaliser la coagulation.

Il resterait maintenant à expliquer la coagulation par la chaleur. Ici les choses sont beaucoup moins claires : il est possible que la chaleur agisse en dissociant les sels qui existent toujours mélangés aux colloïdes naturels, de façon à déterminer l'apparition d'ions électrisés, qui détermineraient à leur tour la gélification ; mais ceci n'est qu'une hypothèse.

J'ai eu l'occasion de donner à ces idées une confirmation et une extension nouvelles : lorsqu'on fait passer la décharge électrique dans un récipient qui contient un gaz à une pression très réduite (moins d'un dix-millième d'atmosphère), la cathode métallique projette autour d'elle sa propre substance, qui vient se déposer en couche miroitante sur les parois internes du vase. Or, j'ai pu établir que ces éléments matériels, for-

més autour d'une charge négative que fournit également la cathode, possèdent les dimensions et les propriétés générales des granules négatifs, de telle sorte que l'intérieur du récipient constitue une sorte de colloïde gazeux. Le dépôt qui s'effectue sur les parois intérieures a tous les caractères d'une coagulation, et cette coagulation est encore déterminée par la décharge des granules, car elle se produit sur toutes les parois électrisées positivement, tandis qu'elle refuse de se faire sur les parois négatives. Les mêmes règles reçoivent donc leur application dans un cas nouveau et, en apparence, assez différent des précédents.

*
* *

Telles sont, en gros, nos connaissances sur les colloïdes. Le sujet, on le voit, est loin d'être épuisé. Ce qui fait sa grande importance, c'est que tout être vivant est formé de colloïdes liquides ou coagulés. Le suc cellulaire, une partie de la sève et du latex des végétaux, le sang, le lait, toutes les humeurs des animaux sont à structure colloïdale; les gels forment la paroi des cellules, l'amidon, l'osséine, et toute la partie solide des tissus vivants. Ainsi, bien que l'état colloïdal ne soit pas spécifique de la

vie, puisqu'il existe des colloïdes minéraux, il doit être spécialement adapté aux multiples fonctions vitales.

En premier lieu, le colloïde est plastique. Il a une souplesse qui lui permet de se déformer sans se rompre, et grâce à laquelle la machine vivante est construite sur un plan tout différent de nos mécanismes industriels. Ceux-ci n'utilisent qu'exceptionnellement les matériaux déformables, comme le cuir ou le caoutchouc ; ils sont constitués de parties solides, rigides, qui se meuvent tout d'une pièce par glissement ou par rotation autour d'un axe. Dans les êtres vivants, au contraire, les mouvements sont produits par extension ou par contraction d'un tissu élastique. L'hélice du navire et la nageoire caudale du poisson représentent ces deux solutions différentes d'un même problème. Mais la nature n'a pas le choix entre elles ; la seconde lui est imposée par la loi de nutrition qui exige la continuité des tissus. Ainsi tout se tient, et nous ne pouvons pas concevoir une partie, si petite qu'elle soit, d'un être vivant, qui ne soit constituée d'un assemblage de colloïdes liquides ou coagulés ; ou alors cette partie est un déchet, un calcul dans le foie, ou une pierre dans la vessie.

Une seconde qualité, tout aussi précieuse, du

colloïde est l'insolubilité des granules, non pas seulement approximative, mais absolue. Beaucoup de corps sont regardés couramment comme insolubles, qui abandonnent cependant une part de leur substance au liquide ambiant. Si les granules étaient dans ce cas, ils ne tarderaient pas à disparaître dans le milieu intermicellaire. Considérons, par exemple, une solution d'or colloïdal contenant, par millimètre cube, un milliard de granules, d'un diamètre moyen de quinze millicrons et que nous supposerons sphériques pour plus de simplicité. Un milligramme de métal sera contenu dans trente centimètres cubes de cette solution, c'est-à-dire dans un volume de liquide six cent mille fois supérieur au sien, et la surface développée de ce milligramme d'or atteindra deux cents centimètres carrés. Dans ces conditions et avec une telle surface, on conçoit que, si l'or avait une solubilité quelconque, il passerait rapidement à l'état dissous.

La même remarque s'applique aux tissus vivants. Les cellules ne vivent qu'à condition d'être parcourues par un flux liquide, incessamment renouvelé. Elles fondraient comme du sucre dans l'eau si leur paroi, formée d'un colloïde coagulé, et les micelles intérieures n'étaient

pas rigoureusement insolubles. On peut donner en exemple une expérience de Trenkmann, dans laquelle les bacilles de la tuberculose, ensemencés au nombre de seize cents par centimètre cube, se sont maintenus en vie. Dans cette expérience, chaque gramme de matière vivante présentait une surface développée de dix mètres carrés (en ne tenant compte que du contour apparent des cellules) et était plongé dans dix mètres cubes d'eau.

On peut remarquer encore combien cet énorme développement superficiel est favorable aux échanges qui constituent la vie. Le colloïde idéal, formé d'eau pure et de micelles suspendues, n'est pas celui qu'on rencontre dans l'être vivant. Celui-ci est mélangé de cristalloïdes, dont les uns servent d'aliments et les autres forment des déchets. L'atmosphère doit parvenir au plus profond de cet être et agir, tantôt par son oxygène, tantôt par son acide carbonique, d'autres fois encore par son azote. Tous ces échanges s'effectuent, dans l'être vivant, avec une rapidité qui tient évidemment à leur structure micellaire et à l'étendue de leur surface.

Il y a encore autre chose : les membranes gélifiées des colloïdes possèdent une propriété

qu'on ne retrouve dans aucune substance ; elles sont *semi-perméables*, c'est-à-dire capables d'effectuer un triage entre les corps qu'elles laissent passer et ceux qu'elles arrêtent au passage ; et elles manifestent cette propriété avec une diversité presque infinie. Le cas le plus général et le plus simple est celui où la paroi de la cellule agit comme la membrane de parchemin (qui est aussi un colloïde coagulé) du dialyseur, en laissant passer l'eau et les solutions salines et en arrêtant les micelles. Cette constitution est évidemment imposée par les conditions de vie des cellules qui doivent empêcher leurs micelles d'aller dans le milieu extérieur, admettre des aliments et éliminer les déchets.

Mais il y a mille degrés dans la perméabilité des membranes : les unes ne se laissent traverser que par l'eau et interdisent le passage même aux molécules cristallines comme le sucre. D'autres choisissent les molécules auxquelles elles ouvrent la porte : les cellules des poils absorbants des racines ne laissent pas entrer, pêle-mêle, tous les sucs de la terre ; si on analyse les sèves brutes de divers végétaux poussés côte à côte dans le même terrain, on leur trouve des compositions différentes. Et ces propriétés sélectives de chaque membrane peu-

vent être modifiées profondément dans certains cas : les parois de la betterave vivante sont imperméables au sucre, sans quoi la racine abandonnerait ce produit à l'eau de pluie ou à celle du sol ; mais, quand la plante est morte, ses parois cessent de retenir le sucre, et c'est sur cette propriété qu'est fondé le traitement industriel des sucreries. Les membranes du rein sont normalement imperméables au glucose et à l'albumine contenus dans le sang, elles ne se laissent traverser que lorsqu'elles ont subi les altérations causées par le diabète ou l'albuminurie.

Ce n'est pas demain qu'on expliquera tous ces faits. Évidemment, on pensera à imaginer, à l'intérieur des cloisons semi-perméables, des pertuis de formes appropriées à celles des molécules qu'elles admettent. Mais il n'est pas probable que les membranes agissent d'une façon aussi simple et par un triage purement mécanique. Au XVIIIe siècle, on n'eût pas manqué de dire : c'est simple, donc c'est vrai. Aujourd'hui, mieux avertis de la complication des phénomènes naturels, surtout dans les milieux vivants, nous sommes tentés de penser, au contraire, qu'une telle explication est trop simple pour être exacte.



LES CRISTAUX LIQUIDES

LES CRISTAUX LIQUIDES

Les manuels du baccalauréat, qui simplifient les choses et qui ont bien raison de le faire, nous apprennent qu'il existe deux sortes de matière, amorphe et cristallisée ; les cristaux sont des solides limités par des faces planes, et tout ce qui n'est pas cristallisé est amorphe ; mais la réalité est autrement plus compliquée et il existe, entre les deux types extrêmes décrits par les manuels, une variété infinie de formes intermédiaires. Voici par exemple un morceau de quartz ; si nous l'examinons au microscope, nous y reconnaîtrons des cavités remplies d'un liquide qui est ordinairement de l'acide carbonique ; ces cavités ont la forme d'un cristal ; bien entendu, nous ignorons par quel artifice la nature a pu réaliser ce cristal négatif et le remplir d'un gaz liquéfié, mais nous voyons déjà avec quelle aisance elle varie ses effets et développe un thème général. Une autre anoma-

lie, bien connue, nous est offerte par le diamant : brut, mais dégagé de sa gangue, le diamant présente des faces convexes ; par suite ses arêtes, qui sont les intersections de ces faces, sont également courbées ; c'est d'ailleurs à cette courbure, autant qu'à sa dureté, que le diamant doit son emploi à la taille du verre.

Prenons maintenant un cristal quelconque, par exemple un octaèdre d'alun et taillons-le, à la lime ou au couteau, en forme de sphère ; si nous plongeons cette sphère dans une solution concentrée d'alun, elle s'y nourrit peu à peu et grossit en régénérant l'octaèdre primitif; de même un grain d'alun, si petit qu'il soit, pourvu qu'il provienne d'un cristal, peut servir de germe à une cristallisation lorsqu'on le plonge dans une solution sursaturée. Ceci prouve bien que, si l'état cristallin est révélé par l'existence de facettes, il peut aussi exister sans elles et dans une matière d'apparence amorphe; il est dû au mode d'arrangement des molécules et peut se manifester tantôt par l'existence de clivages, tantôt par les variations de l'élasticité et de la dilatation suivant les directions, tantôt par la biréfringence, qui est la propriété de dédoubler un rayon lumineux. C'est seulement lorsque tous ces caractères sont absents, c'est-à-dire

lorsque la matière a la même constitution dans toutes les directions, qu'on a affaire à un corps réellement amorphe. Or, on admettait jusqu'ici que les liquides devaient à leur mobilité une structure parfaitement homogène qui les condamnait à l'état amorphe ; mais un physicien allemand, M. Otto Lehmann, nous a montré récemment que notre erreur était grande et qu'il existait des cristaux très bien définis, quoique entièrement liquides.

Lorsqu'on observe au microscope une solution alcoolique d'oléate d'ammoniaque, qui refroidit lentement, on voit apparaître des cristaux transparents qui ont la forme de deux pyramides allongées accolées par leurs bases ; ils sont très biréfringents et présentent par suite tous les caractères qui définissent l'état cristallin, mais ils sont parfaitement liquides, comme le milieu qui les entoure et dont ils se sont séparés par refroidissement ; en agitant la liqueur, on les voit se déformer en se déplaçant et se courber pour franchir le moindre obstacle, grain de poussière ou bulle d'air. On peut même les étirer en une longue bande ; ils reprennent leur forme en même temps que leur liberté. Coupons en deux un de ces cristaux ; les deux moitiés se régénèrent aussitôt, de nouvelles pyramides se

développent, aux dépens de la matière inférieure, sur les plaies sectionnées, et le cristal primitif donne finalement deux cristaux séparés et complets. Inversement, approchons deux cristaux jusqu'au contact; nous les verrons se pénétrer peu à peu et se fondre en un seul, semblable aux constituants. Il y a pourtant une exception curieuse : si les cristaux qui s'abordent se rencontrent presque à angle droit, ils fusionnent encore, mais en se mettant en croix l'un sur l'autre de façon à former ce que les minéralogistes appellent une macle.

L'oléate d'ammoniaque n'est pas seul à former des cristaux liquides ; beaucoup d'autres corps sont dans le même cas : on peut par conséquent, en associant ces corps dans un même dissolvant, les faire cristalliser côte à côte. Supposons maintenant que deux de ces cristaux, de nature différente, viennent en contact ; on les voit aussitôt se réunir en un seul cristal, mais sans se mélanger ; le corps qui a la plus forte tension superficielle forme le noyau du cristal mixte et l'autre se répand à sa surface et le recouvre en prenant la forme cristalline qui lui est propre.

On voit l'intérêt de ces constatations ; le cristal solide est une masse rigide dont on ne peut faire jouer les articulations sans la disloquer et

la détruire ; aussi est-il impossible d'y observer le mode de liaison des éléments. Au contraire, un cristal liquide est quelque chose de vivant ; à le voir se déformer et se reconstituer, on se rend compte qu'il n'est pas formé uniquement d'un empilement de particules polyédriques, mais que des forces agissent dans sa masse ; ces forces ne peuvent pas être, comme dans la matière amorphe, dirigées de molécule à molécule, car de telles forces donnent comme figures d'équilibre, des sphères, des gouttes ou les diverses surfaces courbes qu'on observe en capillarité ; M. Lehmann arrive donc à conclure que ce qui caractérise vraiment l'état cristallin, c'est l'existence de forces de rotation, c'est-à-dire de couples. Cette manière de voir explique bien des choses ; dans la masse cristalline, il y a, pour ainsi dire, concurrence entre les forces de rotation et les attractions moléculaires ; si les premières prédominent, il se produit un véritable cristal, au sens courant du mot ; si les secondes l'emportent nettement, on a un corps, amorphe en apparence, mais qui présente la structure interne des milieux cristallisés ; enfin si ces deux groupes d'actions s'équilibrent, on observe des formes intermédiaires. Ceci va s'éclairer par quelques exemples.

Quand on chauffe un liquide organique, le paraazoxyanisol, on obtient, après une fusion très nette, un liquide trouble ; ce trouble est dû à des gouttelettes liquides et sphériques qui flottent dans la liqueur, absolument comme des gouttes d'huile dans un liquide de même densité ; mais elles sont loin d'être amorphes ; on peut aisément s'en rendre compte par des méthodes optiques qui permettent en quelque sorte d'en faire l'anatomie ; la matière est distribuée dans ces gouttes de paraazoxyanisol, non pas au hasard, mais suivant des cercles parallèles enfilés sur un diamètre qui forme l'axe de symétrie ; si maintenant deux gouttes viennent à se rencontrer, elles fusionnent en un ensemble qui prend encore la forme sphérique, comme feraient deux gouttes d'huile, mais les traces de l'organisation des constituants se sont conservées dans l'ensemble ; il y a deux axes autour desquels les éléments forment non plus des cercles, mais des courbes en forme de huit ; et les choses se compliquent encore par la réunion d'un plus grand nombre de gouttelettes.

M. Lehmann a étudié d'autres liquides, où l'état cristallin ne se révèle pas seulement par la structure interne, mais se traduit extérieurement par les formes les plus bizarres ; on voit

ainsi apparaître tous les intermédiaires entre la goutte sphérique et le cristal : gouttes elliptiques, bâtonnets terminés en pointe et qui peuvent se réunir de façon à former des figures semblables aux fleurs de la neige, cristaux à faces bombées et à arêtes courbes. Ces formes ne sont pas seulement variées, elles sont instables et changeantes ; au contact d'une bulle d'air, d'un grain de poussière, on voit les pseudo-cristaux s'allonger, croître irrégulièrement dans un sens ou dans un autre en présentant des mouvements vermiculaires, bourgeonner et se fragmenter à la manière de certains organismes inférieurs. Tous ces phénomènes ont été photographiés et même cinématographiés par M. Lehmann. On voit qu'ils n'intéressent pas seulement le cristallographe. Ils montrent à celui-ci combien l'état cristallin est plus varié et plus riche de formes qu'on ne l'avait pensé jusqu'ici, et qu'il existe un nombre infini d'intermédiaires entre le cristal et la matière amorphe ; mais le biologiste peut aussi faire son profit de ces expériences, en constatant que beaucoup de mouvements qui s'accomplissent dans la cellule vivante ne sont que des déformations de cette matière pseudo-cristalline.

LE RADIUM

SON ORIGINE ET SES TRANSFORMATIONS

LE RADIUM

SON ORIGINE ET SES TRANSFORMATIONS

Personne n'a oublié la révolution scientifique qui a marqué la fin du XIXe siècle : Röntgen venait à peine de découvrir les rayons X, lorsque les travaux d'Henri Becquerel et des Curie vinrent, à leur tour, étonner le monde. A ce moment, l'ampoule radiographique occupait tous les physiciens. Divers savants, entre autres M. H. Poincaré, avaient cru voir dans la fluorescence du verre de cette ampoule la cause excitatrice des rayons de Röntgen ; partant de cette idée, qu'on a reconnue fausse, Becquerel eut, en 1896, l'heureuse inspiration de s'adresser aux sels d'uranium, dont la fluorescence est connue de longue date, et de rechercher si ces corps n'émettaient pas des rayons X ; ces corps se montrèrent capables d'impressionner une plaque photographique, enveloppée de papier

noir, et de donner des clichés analogues aux radiographies. Mais on ne tarda pas à reconnaître que les sels non fluorescents d'uranium et l'uranium lui-même possèdent la même propriété ; leur activité est proportionnelle à leur teneur en uranium, quelle que soit la forme sous laquelle ce métal est engagé. Cette activité, liée à la présence de l'atome d'uranium, se manifeste, non seulement par l'impression photographique, mais encore par la conductibilité électrique qui est communiquée à l'air ambiant. C'est même par ce dernier caractère qu'on la mesure, en déterminant la vitesse de décharge d'un corps électrisé que l'on soumet, dans des conditions bien déterminées, à l'action de la matière active.

Ainsi, l'uranium fut le premier élément radioactif qu'on eût découvert et sa radiation, reconnue différente des rayons X, fut justement désignée sous le nom de *rayons Becquerel*. Deux ans plus tard, en 1898, M. Schmidt et Mme Curie montrèrent, presque simultanément, qu'un autre corps, le thorium, et tous ses composés partageaient avec l'uranium la propriété découverte par Becquerel. Après cette découverte, on pouvait se demander si la radioactivité appartenait séparément à l'uranium ou au thorium purs, ou

si elle ne tenait pas à quelque élément très actif contenu à dose infinitésimale dans ces deux corps. Une étude systématique, faite par Mme Curie, montra que certains minéraux possédaient une activité bien supérieure à celle qu'on aurait dû attendre d'après leur teneur en uranium et en thorium ; comme l'analyse de ces corps comportait une imprécision voisine d'un centième, on pouvait espérer que leur radioactivité était due à quelque élément inconnu, inclus à dose minime.

C'est à la recherche de cet élément hypothétique que M. et Mme Curie se livrèrent alors, avec la collaboration de M. Bémont : un formidable labeur permit de caractériser dans le plus actif des corps essayés, la pechblende, deux nouveaux éléments radioactifs, dont l'un, voisin du bismuth par ses propriétés chimiques, reçut le nom de *polonium*, tandis que l'autre, le *radium*, se rapprochait du baryum par l'ensemble de ses caractères. L'année suivante, en 1899, M. Debierne isolait des mêmes minéraux un nouvel élément radioactif, l'*actinium*. De tous ces nouveaux corps, le radium se trouva être le plus stable et le plus facile à caractériser ; à mesure qu'on l'obtenait dans un état de pureté plus grande, ses caractères spécifiques se dessi-

naient plus nettement ; l'analyse spectrale y découvrait des raies distinctes de celles de tous les corps connus ; son poids atomique, 226, était différent de celui du baryum, 137. Mais ce n'est qu'en 1902 que Mme Curie parvint au chlorure de radium pur, et c'est en 1910 seulement qu'elle réussit, aidée par M. Debierne, à isoler de ce chlorure quelques parcelles d'un métal blanc, brillant, fondant à 700 degrés, très altérable à l'air et qui décompose l'eau : c'est le radium, l'élément dont les propriétés extraordinaires se transmettent à toutes ses combinaisons.

Aujourd'hui, suivant les procédés indiqués par M. et Mme Curie, la préparation des sels de radium se fait industriellement, dans une usine d'Allemagne et deux usines françaises[1]. Il a fallu renoncer à utiliser dans ces dernières le minerai le plus riche que l'on connaisse actuellement : la pechblende de Joachimstal, en Bohême, qui contient jusqu'à un décigramme de radium par tonne ; ce minerai, formé en majeure partie par de l'oxyde d'uranium, se présente dans la mine sous forme d'un filon dont l'épaisseur dépasse rarement trois ou quatre centi-

1. Certains savants effectuent le traitement pour leur propre compte, comme Sir William Ramsay, qui a obtenu 196 milligrammes de radium au moyen d'un millier de tonnes de pechblende de Trenwich en Cornouailles.

mètres ; exploité par le gouvernement autrichien pour l'extraction des sels d'uranium, il laisse un résidu dont plusieurs tonnes avaient, jadis, été mises à la disposition de Mme Curie ; mais l'Autriche garde maintenant pour elle ces précieux résidus. Il faut recourir à des minerais plus pauvres, qui proviennent de Madagascar, du Tonkin et surtout du Portugal ; leur prix varie et peut atteindre jusqu'à vingt-cinq mille francs par tonne, ce qui met le gramme de radium, non extrait, à deux cent cinquante mille francs environ ; après extraction, le prix de vente est deux fois plus élevé, ce qui s'explique aisément par la longueur des manipulations nécessaires.

L'opération, conduite sur trois cents kilos de minerai à la fois, comprend un broyage préliminaire et un premier traitement qui élimine les neuf dixièmes de la gangue inactive, puis une deuxième série opératoire à la suite de laquelle le radium, isolé avec le baryum, forme une masse globale d'un à deux kilogrammes. On élimine alors progressivement le baryum, par une série méthodique de cristallisations qui laissent finalement un résidu minuscule de chlorure ou de bromure extraordinairement actif, spontanément lumineux dans l'obscurité, ayant

toutes les propriétés des sels de radium pur. Si l'on prend pour unité l'activité de l'uranium, le traitement préliminaire laisse un résidu dont l'activité s'élève à cinquante ou soixante ; cette activité est portée à mille par les fractionnements ultérieurs ; les dernières cristallisations, effectuées au laboratoire, l'élèvent jusqu'à deux millions.

Ainsi, toute la vie d'une usine qui traite annuellement plusieurs centaines de tonnes de minerai se résume dans un gramme, une pincée de chlorure de radium. La chimie ne nous offre pas d'autre exemple d'un corps aussi rare et aussi coûteux; pourtant, c'est autour de ce corps, dont il n'existe pas vingt grammes à l'état isolé dans le monde entier, que pivotent actuellement les plus légitimes espoirs de la science.

C'est que ce produit, que s'arrachent les laboratoires, ne sert pas seulement à des recherches scientifiques ; il a déjà reçu des applications médicales assez importantes pour que le radium soit, non seulement vendu, mais loué, à la dose d'un ou deux milligrammes, aux médecins et aux instituts médicaux qui l'utilisent. Ses multiples radiations ont, en effet, la propriété de pénétrer les tissus vivants, à des profondeurs

variables avec leur nature, et de les détruire en les rajeunissant, de telle sorte que des cellules vouées à une dégénérescence morbide sont éliminées et laissent la place à des cellules saines et vigoureuses. Tous ces effets de cicatrisation ont été constatés dans les *nævi* vasculaires, ou taches de vin, les *lupus*, les *angiostomes* de la face et dans les difformités causées par le rhumatisme articulaire. Plus récemment, on a montré que la radiumthérapie était capable d'atteindre, en profondeur, les tumeurs sanguines et lymphatiques et les affections cancéreuses qui ont fait jusqu'ici le désespoir des chirurgiens. Pour ces diverses applications, les sels de radium sont tantôt injectés directement dans les tissus, tantôt introduits à l'intérieur par électrolyse, tantôt étendus sous forme de pâte sur une toile maintenue au voisinage de la partie malade, avec interposition d'un écran métallique destiné à localiser l'action du rayonnement. Enfin, il y a lieu d'attribuer au radium les propriétés, encore mal définies, mais incontestables, de certaines eaux minérales, dont la composition chimique ne suffit pas à expliquer le rôle et qui n'agissent efficacement qu'au griffon même de la source.

*
* *

Tous ces résultats suffiraient à justifier le bruit qui s'est fait autour de la découverte du radium et la célébrité acquise en quelques mois par le savant infiniment modeste qu'était Pierre Curie. Mais il y a plus. La radioactivité n'est pas une anomalie, une exception, dans la nature ; c'est une propriété très répandue, peut-être même universelle, de la matière. La révélation de cette propriété a été l'origine d'un mouvement scientifique, dont on peut prendre une idée en lisant les titres des travaux innombrables auxquels elle a donné sujet, les livres et les revues qui lui sont spécialement consacrés. Il faut remonter aux découvertes de Pasteur pour trouver une pareille poussée de faits et d'idées ; aussi ne doit-on pas s'étonner si les résultats, acquis dans une louable émulation de tous les pays civilisés, présentent quelque incohérence et quelques contradictions. Par bonheur, Mme Curie a pris soin de mettre en ordre et à jour toutes ces acquisitions : la publication de son *Traité de Radioactivité*[1], en atten-

1. Gauthier-Villars, éditeur, 1910.

dant le futur Institut du Radium qui va s'élever au cœur du Paris studieux, témoigne du mouvement profond causé par les nouvelles découvertes ; c'est lui qui nous fournira le moyen de renseigner le lecteur sur le travail qui s'est poursuivi depuis quinze ans dans les laboratoires.

Le premier point qui frappe, lorsqu'on jette un coup d'œil d'ensemble sur les résultats acquis, c'est le nombre considérable des éléments radioactifs. Nous en donnerons d'abord la liste, en accompagnant chaque élément d'une constante numérique qu'on appelle sa *période* et qui le caractérise comme nous le verrons tout à l'heure :

I. — FAMILLE DU RADIUM

	Période.
Uranium.	60 millions de siècles (?).
Radio-uranium	(?)
Uranium X.	24,6 jours.
Ionium	300 siècles (?).
Radium	2 000 ans (?).
Émanation du radium. . .	3,85 jours.
Radium A	3 minutes.
Radium B	26,7 minutes.
Radium C	19,5 minutes.
Radium D	15 ans.
Radium E	4,8 jours.
Radium F (polonium). . .	140 jours.

II. — FAMILLE DU THORIUM

	Période.
Thorium	300 millions de siècles (?).
Mésothorium 1	5,5 ans.
Mésothorium 2	6,2 heures.
Radio-thorium	2 ans.
Thorium X	3,6 jours.
Émanation du thorium	53 secondes.
Thorium A	10,6 heures.
Thorium B	55 minutes.
Thorium C	quelques secondes.
Thorium D	3,1 minutes.

III. — FAMILLE DE L'ACTINIUM

	Période.
Actinium	(?)
Radio-actinium	19,5 jours.
Actinium X	10,5 jours.
Émanation de l'actinium	3,9 secondes.
Actinium A	36,1 minutes.
Actinium B_1	2,15 minutes.
Actinium B_2	(?)
Actinium C	5,1 minutes.

IV. — ÉLÉMENTS NON CLASSÉS

Potassium Rubidium	Période inconnue, mais très supérieure à celle du thorium.

Sur ces trente-deux corps, quatre seulement, le thorium, l'uranium, le potassium et le rubidium, étaient connus avant les recherches sys-

tématiques sur la radioactivité. Les deux derniers, mille fois moins actifs que l'uranium, sont aux limites de ce qu'on peut apprécier avec la sensibilité actuelle des appareils. En réalité, il n'est pas de corps dans la nature qui ne manifeste une très légère radioactivité ; mais il est impossible de dire si cette propriété est spécifique ou si elle tient à des traces d'impuretés.

Toutes les substances dont nous venons de donner la liste sont considérées, jusqu'à nouvel ordre, comme des éléments, ou corps simples ; mais leur nature est différente de celle des corps dont les atomes immuables ont servi de base à la chimie classique. Dans le trouble des premiers temps qui ont suivi la découverte du radium, bien des hypothèses ont été mises en avant pour en expliquer les propriétés ; une seule a survécu, celle de la *désintégration atomique*, énoncée à peu près simultanément par le physicien anglais Rutherford et par M. et Mme Curie ; elle a le mérite de rendre compte des faits connus sans jeter à bas l'édifice, si péniblement élevé, de la physique et de la chimie. Cette théorie suppose que l'atome radioactif est un système complexe et en équilibre instable. Sous l'action de forces encore inconnues, mais qui sont très probablement intérieures au

corps lui-même, l'atome se brise, fait explosion en quelque sorte, laissant comme résidu de sa transformation, soit un nouveau corps radioactif qui évolue à son tour et se désintègre suivant les lois qui lui sont propres, soit un élément inactif, c'est-à-dire un atome stable, auquel cas la transformation s'arrête.

Cette révolution atomique est accompagnée d'une émission de chaleur, parfois même de lumière, et d'une projection des radiations α, β et γ, qui sont les agents actifs de la radioactivité. Les rayons α sont des atomes d'un corps simple, l'hélium, porteur de charges électriques positives ; les rayons β consistent en une projection d'électrons, ou atomes d'électricité négative ; enfin les rayons γ sont analogues aux rayons X ; ils consistent probablement, comme eux, en des ébranlements non périodiques, ou pulsations, communiqués à l'éther. Ces diverses formes de rayonnement n'apparaissent pas simultanément dans tous les cas ; leur intensité et la vitesse des masses électrisées α ou β diffèrent grandement avec le corps qui se désintègre ; ces divers facteurs caractérisent donc l'élément radioactif ; mais ce qui le caractérise avec plus de précision encore, c'est la « période » de désintégration.

Considérons, par exemple, un milligramme de radium pur ; c'est une masse à peine perceptible qui renferme un milliard et demi de milliards d'atomes. Or, toutes les secondes, quinze millions de ces atomes font explosion en donnant une autre substance radioactive, qui est « l'émanation » du radium. La vitesse de cette transformation est immuable ; du moins, nous ne connaissons aucun moyen de l'accélérer ni de la ralentir ; qu'on engage le radium dans telle combinaison chimique qu'on voudra, qu'on le refroidisse ou qu'on l'échauffe, la désintégration continuera à s'effectuer suivant la même loi ; une fraction, toujours la même, sera, à chaque instant, décomposée. La masse du radium ira donc en diminuant peu à peu, si bien qu'après deux mille ans environ[1], elle sera réduite de moitié. Ce temps est la « période » de désintégration du radium. Chaque élément radioactif est ainsi caractérisé par sa période, c'est-à-dire par le temps pendant lequel sa masse diminue de moitié. Rien n'est plus variable que

1. Ce nombre n'est donné qu'à titre d'indication, car il comporte une grande incertitude ; on peut seulement affirmer qu'il n'est ni dix fois trop grand, ni dix fois trop petit. La même observation s'applique au thorium, à l'uranium et à l'ionium, qui évoluent trop lentement pour qu'on ait pu évaluer autre chose que l'ordre de grandeur de leur période.

cette durée ; elle se compte en millions de siècles pour les corps relativement stables, en secondes pour certains corps qui ne font qu'apparaître pour se transformer.

Revenons à notre milligramme de radium. L'émanation n'est pas le seul produit de sa désintégration ; la dislocation atomique s'accompagne d'une émission de rayons α, β et γ. Les premiers, animés d'une faible vitesse, sont arrêtés par le moindre obstacle, comme l'air ambiant pris sous une épaisseur voisine du millimètre. Au contraire, les électrons qui forment le rayonnement β sont projetés avec une violence inouïe ; leur vitesse atteint et dépasse 250.000 kilomètres par seconde ; ils sont capables de traverser des obstacles très résistants, par exemple des lames de métal ayant plusieurs centimètres d'épaisseur ; aussi lorsqu'on enferme un sel de radium dans un tube de verre scellé, les charges négatives s'échappent avec les électrons tandis que les rayons α, emprisonnés par le verre, laissent l'intérieur du tube électrisé positivement ; cette électrisation est parfois assez intense pour donner naissance à une étincelle qui produit la rupture du tube.

Enfin, la désintégration du radium s'accompagne d'une émission continue de lumière et de

chaleur ; cette émission, découverte en 1903 par MM. Curie et Laborde, a pour effet de maintenir le sel de radium à plusieurs degrés au-dessus des corps environnants. Des expériences précises ont montré que chaque gramme de radium dégage deux calories par minute, c'est-à-dire assez de chaleur pour élever de deux degrés, dans ce même temps, un poids d'eau égal au sien. Il est probable que cette chaleur provient, pour la plus grande part, de l'arrêt brusque des rayons α qui parcourent un faible trajet à partir de leur point d'émission et dont la force vive, brusquement annulée, est convertie en une quantité équivalente de chaleur.

En tout cas, en se tenant exclusivement aux faits, on peut traduire par une relation analogue aux équations chimiques la transformation subie par l'atome du radium. On a :

Radium = Matière : Émanation + hélium (rayons α)
+ Énergie : rayons β + rayons γ + chaleur +
+ lumière.

Dès à présent, cette équation peut s'écrire sous forme quantitative, c'est-à-dire qu'on connaît les masses de matière et les quantités des diverses énergies qui y figurent ; et il n'est pas douteux que, d'ici à quelques années, on soit en

état d'écrire, pour les diverses désintégrations, des équations aussi précises.

*
* *

Prenons maintenant une solution de bromure de radium dans l'eau ; elle dégage constamment de petites bulles gazeuses qu'on peut recueillir dans une éprouvette ; pour un gramme de sel, on obtient ainsi environ dix centimètres cubes de gaz par jour ; soumis à l'analyse, ce produit apparaît comme constitué par de l'hydrogène et de l'oxygène. L'eau est donc décomposée par le radium. En faisant passer ces gaz dans un tube entouré d'air liquide, Ramsay et Soddy constatèrent en outre qu'il se condensait une goutte microscopique d'un liquide qui, ramené à la température ordinaire, se vaporisait et se transformait en un gaz spontanément lumineux dans l'obscurité, qui est « l'émanation ». L'émanation obéit à la loi de Mariotte, comme les gaz ordinaires, car en doublant son volume, on réduit de moitié sa force élastique ; on peut déterminer sa densité, qui est quintuple de celle de l'air ; son spectre d'émission, obtenu en l'illuminant par la décharge électrique, se caractérise par des raies tout à fait distinctes de celles

du radium et des autres corps connus; on est donc fondé à voir dans l'émanation une espèce chimique distincte. Traitée par les agents chimiques les plus énergiques, elle est toujours restée inaltérée, ce qui rapproche ce corps des gaz inertes de l'atmosphère, comme l'argon, le néon et l'hélium.

Mais l'émanation a la vie courte; une heure après qu'elle a été isolée du radium, elle subit une contraction brusque qui réduit son volume de moitié ; puis on voit apparaître et se développer le spectre de l'hélium ; au bout d'un mois, la transformation en hélium inactif est presque intégrale et le système paraît avoir acquis son état définitif. Il s'en faut, pourtant, que les choses se passent d'une manière aussi simple ; on a pu s'en rendre compte en étudiant les phénomènes de *radioactivité induite*.

Quand on place un corps quelconque, verre, bois, celluloïd, plomb, platine, dans un vase clos qui contient un sel de radium, il arrive que ce corps devient temporairement radioactif; cette propriété appartient aux vases qui ont contenu le radium, aux appareils qui ont servi à le manipuler, aux vêtements et à la personne même des opérateurs, à l'air du laboratoire ; c'est pour cette raison que la salle où se

font les mesures délicates d'activité doit être soigneusement isolée du laboratoire où on manipule le radium; malgré toutes les précautions, une contamination progressive est inévitable : ainsi, écrit Mme Curie, « dans l'École de Physique et de Chimie de la Ville de Paris, où notre travail de découverte des substances radioactives a été effectué et où j'ai fait un travail de concentration du radium jusqu'à l'état de sel pur, il existe une salle qui servait de réfectoire pour les élèves et qui ne communique en aucune façon avec les pièces où nous travaillions et en est même éloignée. Nous n'allions jamais dans cette pièce et aucun des objets dont nous nous servions n'y a été introduit. Cependant, quand une installation électrométrique a été faite dans cette salle, plusieurs années après que nous avions quitté l'École, on a trouvé que la conductibilité de l'air y avait une valeur vingt fois plus élevée que la valeur normale ». Cette propriété, si curieuse et si gênante, ne se manifeste qu'avec les corps, actinium, thorium et radium, qui donnent naissance à une émanation, c'est-à-dire à un gaz radioactif. Rutherford a montré qu'elle avait pour cause le dépôt d'une substance radioactive, abandonnée par l'émanation, sur les corps en contact avec elle. Ces dépôts forment

des pellicules d'une minceur extrême ; il serait vain de chercher à les isoler, mais ils sont solubles dans les acides et la radioactivité induite disparaît lorsqu'on râcle la surface activée.

Nous arrivons donc à conclure que l'émanation du radium ne se transforme pas directement en hélium, mais qu'elle donne des produits intermédiaires. Le premier de ces produits, le radium A, dont la période est de trois minutes, abandonne de l'hélium et se transforme presque instantanément en radium B. Ce corps, un peu moins éphémère, puisque sa période est voisine d'une demi-heure, émet exclusivement des rayons β et se mue en radium C, qui évolue à son tour en émettant des rayons α, β et γ.

Là ne s'arrêtent pas les transformations : lorsqu'un corps a été exposé plusieurs mois à l'émanation du radium, il conserve, après disparition successive des modifications A, B et C, une activité résiduelle qui, loin de s'évanouir, va en augmentant. Il s'est en effet produit, sans doute aux dépens du radium C, un corps faiblement actif, c'est-à-dire à transformation lente ; c'est le radium D qui se détruit à son tour en donnant des corps d'activité plus grande, c'est-à-dire de vie plus courte, le radium E, puis le

radium F. Ce dernier élément, dont la période est de cent quarante jours, s'est trouvé identique au polonium découvert dans les premiers travaux de Mme Curie. Le polonium se transforme à son tour, par une abondante émission de rayons α, en hélium pur, laissant peut-être un résidu inactif qui serait du plomb. Ainsi se termine la série de ces évolutions ; on comprend maintenant pourquoi le polonium a pu être isolé en même temps que le radium, puisqu'il en procède, et aussi pourquoi ce corps, rapidement transformé en matière inactive, s'est évanoui en quelques mois sous les yeux de ceux qui l'avaient découvert, tandis que le radium garde ses propriétés pendant un temps auprès duquel la vie humaine est peu de chose.

On voit aussi comment, en se guidant sur la seule étude de la radioactivité, on a pu caractériser une série de corps dont les quantités sont si minimes qu'ils n'auraient jamais pu être décelés par la balance, ni par aucun procédé d'analyse chimique ; mais il ne faut pas perdre de vue que nous avons pris comme fil conducteur une hypothèse, d'ailleurs la seule qu'on puisse faire logiquement dans l'état présent de la science. Il n'y a aucun doute sur l'existence individuelle du radium et de l'émanation et sur

leur transformation finale en hélium ; mais il est sage de faire des réserves sur la réalité des termes intermédiaires.

Nous savons comment le radium meurt. Le problème de ses origines est aussi palpitant. Une masse quelconque de radium met deux mille ans à se réduire de moitié ; au bout de quatre mille ans, il n'en restera plus qu'un quart, qu'un huitième après six mille ans, et ainsi de suite, si bien qu'un nombre limité de siècles en amène la disparition presque intégrale. Comme, d'autre part, cette dégradation paraît suivre une loi inéluctable, elle a dû se produire depuis les origines des temps géologiques ; on se demande alors comment il a pu subsister même de faibles traces de radium dans l'écorce terrestre. De toutes les hypothèses qu'on puisse faire à ce sujet, la plus raisonnable consiste à supposer que le radium n'est pas un produit primitif, ni le premier anneau de la chaîne qui se termine à l'hélium, mais qu'il procède lui-même d'une lignée d'ancêtres dont la période évolutive est infiniment plus lente que la sienne et qui le forment à mesure qu'il se détruit. Évidemment, reculer un problème n'est pas le résoudre ; mais il n'est pas sans intérêt de faire

disparaître le conflit qui s'élevait entre la faible persistance du radium et la grande durée des âges géologiques.

Jusqu'ici, les transformations radioactives sont toujours apparues comme une fragmentation de l'atome ; si cette règle est générale, le radium ne peut procéder que d'un corps dont l'atome soit plus lourd que le sien ; deux corps seulement, l'uranium et le thorium, possèdent cette propriété ; or il se trouve que les minerais qui contiennent du radium contiennent presque toujours le premier de ces métaux et très fréquemment le second. Le seul minerai de radium actuellement connu, qui soit dépourvu d'uranium, est une pyromorphite, ou chlorophosphate de plomb, trouvée à Issy-l'Évêque, en France ; mais des gisements de phosphate d'uranium existent dans le voisinage et il est naturel de supposer que le radium s'est trouvé transporté, par les eaux pluviales ou de toute autre façon, à une certaine distance de son centre de production ; cette unique exception paraît donc confirmer la règle.

D'autre part, en analysant avec soin les minerais radifères, on a constaté que le rapport du radium à l'uranium y varie dans des limites assez étroites : de 2,34 à 3,76 dix-millionièmes ;

ceci fortifie les présomptions d'une filiation entre l'uranium et le radium. Les divers minéraux radioactifs n'ont pas tous le même âge ; certains existaient depuis des milliers de siècles avant que les autres se fussent déposés dans leurs gisements ; il est naturel que les plus anciens aient subi une transformation plus profonde et contiennent une plus forte proportion de radium ; c'est en effet la règle que l'analyse vérifie.

Mais toutes ces considérations théoriques ne vaudraient pas une expérience directe, une transformation, dûment constatée au laboratoire, de l'uranium en radium. Or, cette expérience est en train, par les soins de MM. Soddy et Mackenzie : une solution d'azotate d'uranium, rigoureusement dépouillée de radium, est en observation depuis quatre ans, laps bien court puisqu'il s'agit d'une transformation pour laquelle la nature dépense les siècles sans compter. Pourtant, ces quatre années ont permis de mettre en évidence la formation d'une petite quantité de radium, qui s'élèverait à *cinq cent-millionièmes de milligramme* pour un kilogramme d'uranium, et la loi de cette production semble indiquer que l'uranium engendre le radium, non pas directement, mais par l'intermé-

diaire d'un ou de plusieurs produits de transition.

Le plus stable de ces éléments intermédiaires est aujourd'hui connu, grâce à MM. Rutherford et Boltwood ; c'est l'*ionium ;* isolé des minerais d'uranium, il présente des propriétés chimiques très voisines de celles du thorium, ce qui nous amène à soupçonner entre les diverses familles radioactives des parentés que les recherches ultérieures éclairciront sans doute. Mais la propriété caractéristique de l'ionium, c'est sa transformation continue en radium ; elle se fait avec lenteur (la période de l'ionium est voisine de trente mille ans), mais avec certitude. En même temps, il y a émission d'hélium sous forme de particules α.

Nous sommes donc en état de calculer le déchet d'hélium qu'une masse déterminée d'uranium engendre, soit directement, soit par l'intermédiaire de ses descendants radioactifs qui se désintègrent à leur tour. On trouve ainsi qu'un gramme d'uranium dégage un millimètre cube d'hélium tous les dix mille ans. Or il arrive, — et c'est une propriété singulière qui tient sans doute à la manière dont l'hélium est projeté sous forme de particules α, — que cet hélium ne se dégage pas, mais qu'il reste emprisonné dans la masse même du minerai ; chacun

de ces atomes s'est enchâssé, comme une balle, au cœur de la roche, d'où il ne se dégage qu'à température élevée. Cette particularité fournit une base scientifique pour l'évaluation de l'âge de certains minerais. Prenons, par exemple, 14 gr. 3 de fergusonite de Norwège, minerai des roches primitives, qui contient du niobium, du tantale, du thorium, de l'uranium, etc. Ce poids de minerai renferme un gramme d'uranium et dégage, lorsqu'on le chauffe, vingt-cinq centimètres cubes d'hélium ; à raison d'un millimètre cube produit par cent siècles, ce corps doit être en place depuis deux millions et demi de siècles : tel serait le recul formidable où des raisonnements vraisemblables placent l'origine des terrains primitifs de notre planète.

Nous connaissons maintenant la généalogie du radium depuis l'uranium, le grand ancêtre, jusqu'à la descendance abâtardie de l'hélium et peut-être du plomb. Des études parallèles ont été conduites sur les familles de l'actinium et du thorium. La radioactivité a été découverte dans d'autres éléments et il semble que cette propriété, plus ou moins atténuée, soit la règle universelle de la matière. La science paraît donc s'orienter vers cette conclusion, qu'il n'y a pas d'atomes immuables, mais que tous se trans-

forment, avec des vitesses variables, les uns dans les autres. On connaît, à ce propos, les célèbres expériences de Ramsay, qui semblaient indiquer une formation d'éléments divers, argon, néon, cuivre, lithium, carbone, aux dépens du radium ou du thorium ; ces expériences ont été reprises, par les soins de Mme Curie, avec les précautions les plus minutieuses, et les résultats de Ramsay n'ont pas été confirmés ; ceci prouve avec quelle attention l'expérimentateur doit avancer, s'il ne veut pas se laisser entraîner par des idées préconçues.

Tout ce que nous savons jusqu'à présent nous indique que la nature ne procède que par désintégration, par rupture d'atomes, si bien que les atomes lourds se transformeraient peu à peu en une poussière plus ténue ; en même temps, l'énergie atomique irait sans cesse en diminuant ; nous retrouvons ici, sous une forme nouvelle, le principe universel de la dégradation de l'énergie, qui paraît entraîner le monde vers son repos définitif ; mais il y aurait imprudence à accepter, sur la foi de quinze années d'expérience, des conclusions qui portent sur la série illimitée des siècles. La nature a peut-être, quelque part, son atelier secret de « réintégrations atomiques » où, par le jeu de forces que nous sommes hors

d'état de réaliser, elle reconstruit d'une main ce qu'elle détruit de l'autre.

*
* *

Revenons au présent, à ce qui est accessible et mesurable, en cherchant à apprécier le rôle que les corps radioactifs jouent dans l'univers. A en juger par les premières apparences, par la pauvreté de ces rares minerais de radium qu'il faut aller chercher si loin et payer si cher, cette action doit être minime. Mais une étude approfondie impose une conclusion inverse. Si les minerais radioactifs exploitables sont rares, en revanche il n'est pas de propriété plus générale, plus diffusée que la radioactivité ; c'est ce qui résulte des innombrables analyses qui ont porté sur tous les matériaux de notre planète. Les roches ignées et éruptives, qui forment les assises profondes de l'écorce, renferment en moyenne 1,7 millièmes de milligramme de radium par tonne ; la terre entière, à ce taux, contiendrait dans sa masse 110 millions de tonnes de radium. Les roches sédimentaires sont un peu moins riches ; les calcaires, surtout, sont presque inactifs ; en revanche, l'activité s'est concentrée dans certains terrains, comme les

argiles, comme le *fango*, limon calcaire et ferrugineux, déposé par les eaux chaudes de Battaglia, dans l'Italie du Nord. En général, l'activité du sol est due au radium et à son émanation ; d'autres fois, elle provient du thorium, que presque toutes les roches contiennent en quantité appréciable, ou à l'actinium, qui rend radioactive la terre de l'île de Capri. Cette activité du sol se retrouve dans les eaux minérales, surtout dans celles qui traversent des roches éruptives anciennes, comme sont les sources de Gastein, de Baden-Baden, de Plombières ; l'existence d'hélium dans les gaz dégagés par ces eaux prouve indirectement qu'elles ont rencontré des terrains radioactifs dans leur trajet souterrain.

Du sol, la radioactivité se répand dans l'atmosphère. Celle-ci possède une activité permanente, particulièrement sensible dans les caves, les puits et les grottes ; on a pu s'en rendre compte, soit en exposant dans ces espaces des lames métalliques qui y acquièrent une activité induite, soit en faisant passer plusieurs mètres cubes d'air dans un serpentin refroidi par l'air liquide, où il se condense une certaine activité résiduelle. Au voisinage immédiat du sol, cette activité est due à la fois aux émanations du

thorium et du radium, mais à quelques mètres d'altitude, l'émanation du thorium, dont la période est très courte, a déjà disparu et les effets observés sont dus presque exclusivement au radium ; en revanche, l'émanation de ce dernier corps paraît diffusée dans la totalité de notre atmosphère ; on la rencontre, à doses très minimes bien entendu, soit dans l'air capté à diverses altitudes, soit dans l'eau de pluie ou dans la neige ; elle existe même dans la mer.

Une dissémination aussi grande des agents radioactifs n'est pas sans agir sur l'équilibre de notre univers ; elle doit jouer un rôle important dans la distribution de l'électricité atmosphérique et M. Carl Barus a montré qu'elle favorisait la condensation de la vapeur d'eau et la formation des nuages ; mais on peut aussi en tirer une conséquence très importante relativement à la chaleur interne du globe.

On sait que la température de la croûte terrestre, à mesure qu'on pénètre dans son intérieur, augmente d'un degré en moyenne tous les trente-cinq mètres. Cette variation a pour conséquence une émission continue de chaleur qui passe, par conductibilité, du centre vers la périphérie ; la terre perd ainsi, par chaque mètre carré de sa surface, une quantité de chaleur

voisine d'une calorie par minute. Jusqu'ici, on expliquait ce fait simplement par l'existence, au centre du globe, d'un noyau surchauffé, peut-être fondu, restant de la sphère liquide que la Terre a dû être aux premiers temps de son histoire. MM. Rutherford et Soddy se sont demandé si cet apport constant de chaleur ne pouvait pas s'expliquer aussi bien par l'existence des éléments radioactifs contenus dans le sol : on a déjà observé, principalement dans le tunnel du Simplon, que la température est anormalement élevée dans les terrains riches en radium. Or, le calcul montre qu'une teneur en radium de trois cent-millièmes de milligramme par tonne serait suffisante pour produire l'effet thermique observé ; nous avons vu que la proportion effective de radium dans la croûte terrestre est environ vingt fois plus grande et l'action du thorium doit encore s'ajouter à celle du radium. Donc, si la teneur en éléments radioactifs est la même en profondeur qu'en surface, nous n'échappons pas à cette conclusion que, non seulement la Terre ne doit pas se refroidir, mais qu'elle est en train de se réchauffer progressivement, puisque la chaleur perdue par la surface est notablement inférieure à celle qui est engendrée dans la masse par les désintégrations atomiques.

Cette conséquence est en opposition si flagrante avec les données les mieux assises de la géologie et avec les plus logiques de nos hypothèses cosmogoniques, qu'il vaut mieux supposer que les éléments radioactifs n'existent que dans la croûte superficielle, ou encore que les hautes pressions du noyau central favorisent les associations atomiques qui compensent les désintégrations de la surface ; le plus sage serait d'avouer que nous ne savons rien de ce qui se passe à l'intérieur du globe.

Notre planète est-elle, dans l'univers, le seul astre qui possède des matériaux radioactifs ? La chose est, *a priori*, peu probable, étant donnée la communauté de composition des mondes révélée par l'analyse spectrale ; d'ailleurs, n'est-ce pas dans le spectre solaire qu'on a découvert l'hélium qui apparaît comme le résidu de toutes les désintégrations ? On s'est donc demandé si l'entretien de la radiation solaire ne se fait pas aux dépens des corps radioactifs. D'après l'énergie que nous recevons du soleil, on peut calculer que chaque mètre cube de cet astre émet par minute 7,2 calories : il suffirait, pour expliquer ce débit calorifique, d'admettre que ce même volume contient 3 gr. 6 de radium. Une proportion aussi élevée ne paraît guère vraisemblable ;

mais même dix fois moindre, elle constituerait encore un facteur important du rayonnement solaire.

Tous ces résultats, qu'on n'aurait pas osé soupçonner il y a vingt ans, nous montrent quel rôle important la radioactivité joue dans l'univers. Loin d'être une exception, une monstruosité de la nature, le radium n'est que le représentant le plus éminent d'une propriété, peut-être universelle, de la matière. Et s'il y a quelque chose de plus étonnant que toutes ces découvertes, c'est qu'on ait attendu si longtemps pour les faire et qu'on n'ait pas soupçonné plus tôt des propriétés, qui remplissent l'univers et qu'on peut mettre en évidence avec les appareils les plus simples de la physique.

LES TERRES RARES

LES TERRES RARES

Malgré les efforts des géologues et des minéralogistes, nous sommes loin de connaître avec précision la composition chimique de notre planète. Il n'y a pas plus de quinze ans que l'analyse de l'atmosphère s'est achevée par la découverte et le dosage des gaz inertes qui s'y superposent à l'oxygène et à l'azote ; quant aux océans, qui forment, autour de la croûte solide, une deuxième tunique, dont l'épaisseur moyenne approche de trois kilomètres, des analyses très précises nous ont fait connaître, depuis longtemps, leur composition. Mais il n'en va pas de même pour cette écorce solide et pour tout ce qui s'étend au-dessous jusqu'au centre du globe.

En admettant, contre toute vraisemblance, que nous connaissions qualitativement tous les corps simples qui entrent dans la composition de cette énorme masse, nous sommes en tout

cas, bien mal renseignés sur les proportions relatives de ces éléments. On dit pourtant que tels corps sont rares, tels autres abondants; mais ces jugements sont assis en général sur de médiocres raisons ; l'abondance ou la rareté d'un corps ne peuvent s'apprécier ni d'après son prix, qui dépend des difficultés de sa préparation, ni d'après la quantité produite, qui est en rapport avec ses applications industrielles, ni d'après sa concentration dans certains gîtes. Il faudrait triturer la planète tout entière dans un mortier, en faire un tout homogène et déterminer la composition centésimale du mélange. A défaut de cette méthode utopique, existe-il des procédés pratiques d'évaluation assez scientifiques pour inspirer quelque confiance ?

En ce qui concerne le noyau central, on peut répondre non sans hésiter. A peine connaissons-nous, grâce à de rares filons échappés à travers les fissures de la croûte, quelques-uns des éléments de l'intérieur ; nous n'avons aucun renseignement sur la composition du noyau central [1], ni même sur son homogénéité.

En revanche, les couches superficielles ont été étudiées en détail ; des milliers d'échantillons,

1. On sait seulement que sa densité moyenne doit être voisine de 7.

analysés avec soin, s'alignent dans les vitrines des musées ; nous connaissons, à un centième près, la composition des grandes assises géologiques qui viennent affleurer à la surface ou que rencontrent les puits de mines ; malgré la distribution irrégulière de ces dépôts, il n'est pas impossible de les cuber et d'apprécier leur importance relative. Cette tâche a été tentée, et non sans succès, aux États-Unis par MM. Clarke et Hillebrand et par M. Johann Vogt en Norvège, qui ont limité leur étude à la pellicule superficielle de la croûte terrestre, sur une épaisseur voisine de quinze kilomètres ; mais cette pellicule contient tous les terrains sédimentaires (dont la puissance dépasse rarement trois ou quatre kilomètres) et le soubassement primaire, formé de granite ou de roches analogues ; ces deux types de terrain, physiquement très dissemblables, diffèrent peu au point de vue chimique, puisque les sédiments ne sont que les débris remaniés des roches primaires.

Pour obtenir un résultat aussi approché que possible, M. Clarke a choisi quinze cents échantillons de roches soigneusement analysées ; il en a constitué par la pensée un mélange homogène, chacune de ces roches étant prise dans la proportion où elle se trouve dans la croûte ter-

restre, et il a calculé la composition chimique de ce mélange idéal; ce qui doit nous inspirer confiance, c'est que les résultats obtenus avec ces quinze cents échantillons diffèrent très peu de ceux qu'on avait calculés antérieurement en opérant seulement sur 880, et même que sept ou huit groupes, portant sur soixante types minéralogiques seulement, ont encore donné des résultats presque identiques. Ceci montre que la proportion d'un élément dans la composition générale de la terre ne dépend guère que de ce qu'en renferment les grandes assises géologiques; les échantillons rares, même à teneur élevée, influent peu. Ainsi la proportion de vanadium dans le monde ne dépend presque pas des gisements très riches qu'on exploite en Espagne et ailleurs; elle est réglée par la quantité qui existe, diffusée à très petite dose, dans beaucoup de roches communes, argiles, grès, minerais de fer.

Examinons maintenant le tableau dressé par Clarke, où les éléments sont classés d'après leur pourcentage décroissant :

Oxygène	47,10	p. 100.
Silicium	27,90	—
Aluminium.	8,10	—
Fer	4,70	—

Calcium	3,50	p. 100.
Sodium	2,70	—
Magnésium.	2,60	—
Potassium	2,40	—
Titane	0,30	—
Hydrogène	0,20	—
Chlore	0,17	—
Carbone	0,10	—
Phosphore	0,10	—
Manganèse	0,07	—
Soufre	0,06	—
Baryum	0,03	—
Fluor	0,03	—
Azote	0,02	—
Chrome	0,01	—
Zirconium	0,01	—
Nickel.	0,005	—
Strontium	0,005	—
Lithium	0,005	—

Viennent ensuite l'étain, le cobalt, l'argon, le brome, l'iode, le rubidium et, en proportion encore moindre, les autres éléments.

Un premier résultat ressort de ces chiffres : c'est que l'oxygène forme à lui seul la moitié de l'écorce superficielle, car il faut tenir compte de ce qu'il entre pour les huit neuvièmes dans l'eau et pour un cinquième dans l'atmosphère ; il est donc l'élément prédominant à la surface. Le silicium vient après, pour une large part, et les 99 centièmes de la croûte terrestre sont formés

par les huit premiers éléments. La surface de la terre est donc un silicate d'alumine, de fer, de chaux, de magnésie et d'alcalis, c'est-à-dire une espèce de verre ou de laitier.

Mais la suite de la liste nous apporte d'étranges révélations. Nous y apprenons que le titane, un métal presque inconnu, est plus abondant que l'hydrogène, le chlore, le carbone ; que le manganèse passe avant le soufre et l'azote ; que le zirconium dépasse le nickel, l'étain et le plomb. Ces résultats renversent, comme on le voit, les notions courantes sur la fréquence relative des éléments. C'est que l'homme a agi sur les éléments minéraux comme sur les êtres vivants : il a sélectionné, il a domestiqué ceux qui pouvaient servir à ses usages ; il a cherché les gîtes qui les contenaient en abondance ; il a découvert des traitements métallurgiques appropriés et il les a introduits dans l'intimité de sa vie ; le fer devait passer pour rare aux âges où l'homme fabriquait des instruments en airain et des bijoux en or.

Aujourd'hui, la conquête du monde minéral continue et s'accélère ; des corps, hier inconnus, sont produits par grandes quantités dès qu'on leur trouve des applications et qu'on découvre des moyens économiques de les obtenir ; c'est

ce qui s'est produit pour l'aluminium, le calcium et le magnésium. Nous avons vu les sels d'uranium et de radium pourchassés, malgré leur extrême rareté, sur toute la surface de la terre, dès le jour où leurs applications leur ont attribué une valeur marchande. Des métaux, comme l'osmium, le tantale, le tungstène, ont passé brusquement du laboratoire à l'usine ; le tantale était, il y a un demi-siècle, un corps si rare que Marignac ne put en avoir à sa disposition qu'une centaine de grammes pour effectuer ses recherches ; il coûte aujourd'hui moitié moins que l'argent. Le tunsgtène, dont on montrait jadis des échantillons, scellés dans un tube de verre, sous forme de globules gros comme une tête d'épingle, est préparé actuellement, à raison de quatre mille tonnes par an, au prix moyen de neuf francs le kilogramme. Les nouvelles lampes électriques à filament de tantale ou de tungstène ont révélé au public le nom de ces métaux ; mais si on réfléchit qu'il suffit d'un kilogramme de métal pour fabriquer 45 000 lampes, on voit que cette brillante application consomme une faible part des métaux réellement produits. En réalité, c'est l'industrie sidérurgique qui règle la production de ces corps : les aciers au carbone ne suffisent plus aux exigences crois-

santes de l'industrie ; on cherche et on réalise des aciers plus durs, ou plus élastiques, ou plus magnétiques, en y incorporant à petite dose des éléments de choix, tungstène, vanadium, tantale. C'est pour des applications de cet ordre qu'on recherche des minerais considérés jadis comme des raretés minéralogiques et que le four électrique produit, sous forme de ferro-silicium, ferro-tungstène, ferro-vanadium, des alliages riches qu'on associe ensuite à l'acier[1].

*
* *

On pourrait multiplier les exemples de ce brusque appel à la gloire de corps considérés longtemps comme rares. Un des plus topiques est fourni par le groupe des oxydes qui portent encore le nom de *terres rares*, bien qu'ils n'aient aucune raison de le conserver.

A la fin du XVIII[e] siècle, il existait dans les collections minéralogiques, quelques échantillons découverts en Suède, en Norvège et dans l'Oural, et dont la nature chimique était parfaitement inconnue. Le Suédois Gadolin isola dans l'un d'eux (qui a reçu le nom de gadolinite) une terre, c'est-à-dire un oxyde assez analogue à la

1. Les aciéries d'Ugines, en Savoie, se sont acquis une juste célébrité dans la fabrication de ces ferro-alliages.

chaux, à laquelle il donna le nom d'yttria ; quelques années plus tard, Klaproth et Berzélius en retirèrent un autre oxyde, la cérite ; au milieu du XIX[e] siècle, les travaux de Mosander montrèrent que ces minéraux formaient une mine presque inépuisable de corps simples. Mais ils paraissaient en même temps créés pour le désespoir des chimistes. Avec une composition très peu variable d'un échantillon à l'autre, ils sont en réalité un mélange d'un grand nombre d'éléments ; parmi ceux-ci, figurent l'uranium, le thorium et, par voie de conséquence, tous les autres corps radioactifs ; mais on y trouve également une série de métaux, dont une quinzaine sont actuellement isolés et qui se ressemblent étrangement, sans pourtant être identiques. Leurs réactions chimiques sont si voisines qu'il faut renoncer, pour les isoler, aux procédés brutaux de la chimie minérale et opérer, comme pour les complexes organiques, par de longues méthodes de fractionnement basées sur des différences de solubilité ou sur des nuances d'affinité chimique. Encore ne réussirait-on pas sans l'analyse spectrale; c'est en observant au spectroscope la lueur d'une étincelle produite à la surface du liquide que le chimiste juge, d'après le renforcement progressif de certaines

raies et la diminution de certaines autres, qu'il marche toujours dans la bonne voie.

On conçoit tout ce qu'un tel travail, poursuivi sur des matériaux extrêmement rares, peut exiger de patience et d'habileté ; pourtant, d'excellents chimistes y ont voué, d'autres y consacrent encore leur vie, sans autre espoir que de servir la science ; il n'y a pas de plus bel exemple de désintéressement scientifique ; c'est donc justice qu'un de ces patients chercheurs, Auer, ait trouvé, chemin faisant, la plus splendide fortune industrielle.

Ainsi, un siècle d'efforts a fait sortir des modestes échantillons d'autrefois une importante collection de corps simples ; leurs noms sont empruntés à toutes les mythologies et quelques-uns sont si peu connus que peu de chimistes pourraient en donner la liste sans se tromper. Ce sont : le *cérium*, le *lanthane*, le *samarium*, le *praséodyme*, le *néodyme*, l'*yttrium*, le *gadolinium*, l'*ytterbium*, l'*erbium*, le *dysprosium*, le *terbium*, l'*europium*, le *lutécium* et le *thulium*. Encore cette nomenclature n'est-elle pas définitive ; certains éléments, tenus actuellement pour simples, seront peut-être dédoublés ; en revanche, des corps considérés comme distincts pourront être identifiés, car la sensibilité de l'analyse

spectrale est telle qu'il suffit souvent d'un cent-millième d'impuretés pour modifier le spectre et faire croire à l'existence d'un élément nouveau.

Les métaux, dont les oxydes constituent les terres rares, forment à eux seuls le cinquième des corps simples actuellement connus, et la profonde analogie de leurs caractères chimiques se complète par une propriété singulière que Sir William Crookes a découverte et dont il a montré la généralité : tous ces corps, ou plutôt leurs sels, soumis dans le vide au choc des rayons cathodiques, deviennent lumineux ; cette phosphorescence, analysée au spectroscope, se résout en un certain nombre de bandes dont les positions sont caractéristiques de chaque élément. Mais il y a plus : lorsqu'on associe deux de ces éléments en mélangeant leurs sels, il arrive que l'un des deux agit comme excitateur par rapport à l'autre et communique à sa phosphorescence une activité tout à fait disproportionnée à sa teneur dans le mélange.

On n'obtient rien de pareil avec les autres corps. Nous sommes donc en présence d'une des familles les plus homogènes et les mieux caractérisées qui soient dans la classification chimique ; d'ailleurs les poids atomiques, comme les propriétés chimiques, varient par degrés

insensibles d'un élément du groupe au suivant. Ainsi, alors que toute la chimie repose sur l'existence d'éléments distincts et d'une individualité très marquée, la famille des terres rares impose à notre esprit l'idée d'une gradation continue dont les échelons sont très rapprochés. Dans la nature vivante, la discontinuité des espèces s'évanouit si on considère les transformations progressives de l'embryon et si l'on envisage toutes les espèces disparues qui forment la transition entre les types actuels. Il semble que la nature ait voulu nous montrer, dans le règne minéral, un phénomène analogue : telle est l'idée que Crookes a traduite dans sa célèbre théorie des *méta-éléments*, où il voit dans les divers métaux des terres rares les résultats de la transformation progressive d'une même matière primordiale, née, pour ainsi dire, avant terme et arrêtée brusquement à des stades différents de son évolution. Il est impossible, à ce propos, de n'être pas frappé par l'association constante des terres rares avec les corps radioactifs, c'est-à-dire avec les agents de transformation les plus puissants que l'on connaisse. Il est probable que cette association n'est pas une pure coïncidence et que les méta-éléments nous apparaîtront un jour, soit

comme des cadavres d'atomes jadis radioactifs, soit comme des produits des forces radioactives qui furent appliquées, dans la série des siècles, à la matière primordiale.

Ainsi ce coin de la chimie, qui semblait réservé aux observations minutieuses et aux détails de la technique, a de quoi intéresser ceux qui demandent à la science des idées générales et des sujets de réflexion. Mais il se trouva aussi que les terres rares ont eu leur épopée, dont le chimiste autrichien Auer von Welsbach fut le paladin.

Auer travaillait à Vienne dans le laboratoire de Lieben et il avait déjà accompli, vers 1880, plusieurs travaux de haute valeur scientifique, entre autres la séparation du didyme, jusque-là réputé comme simple, en néodyme et praséodyme. Au cours de ses recherches, il eut fréquemment à chauffer dans la flamme du bec Bunsen de petites perles formées au bout d'un fil de platine par les terres qu'il étudiait, et il fut frappé par leur éclat et par la nature singulière de la lumière émise : l'erbine ou oxyde d'erbium donnait une lumière verte que le spectroscope dissociait en bandes séparées, alors que la généralité des corps donne, dans les mêmes conditions, une coloration jaune ou

blanche qui présente sans discontinuité toutes les couleurs du spectre.

Pour étudier plus commodément ces apparences, Auer inventa, ou plutôt réinventa (car l'idée n'était pas nouvelle), le manchon de coton trempé dans une solution de sel considéré et placé dans la flamme non éclairante d'un brûleur Bunsen. Il put ainsi vérifier que divers oxydes, entre autres ceux de zirconium et de lanthane, donnaient dans ces conditions une lumière assez vive; mais le manchon se détruisait spontanément, au bout de peu de jours, sans doute par l'action de l'humidité et de l'acide carbonique contenus dans l'atmosphère.

C'est alors qu'il eut l'idée d'essayer des mélanges de divers oxydes ; les résultats obtenus furent meilleurs, à tel point qu'il commença à breveter, en 1885, un certain nombre de ces mélanges et installa, à Atzgendorff près de Vienne, une modeste fabrique de manchons. Mais l'heure du succès définitif n'avait pas encore sonné : « Tandis que les uns, raconte Auer lui-même, voyaient avec bienveillance cette invention, d'autres affectaient beaucoup de scepticisme. Je connais un célèbre industriel du gaz qui était prêt à parier avec n'importe qui, qu'en aucune ville on n'installerait mille becs

en une année ; tel autre, sollicité de s'intéresser à cette industrie, refusa, répondant que sa maison ne s'occupait que d'affaires sérieuses. »

Pourtant, Auer ne se décourageait pas. Son attention se porta sur l'oxyde de thorium, dont la présence paraissait augmenter le pouvoir émissif des autres terres ; il chercha, en vain, à décomposer ce corps en plusieurs constituants ; à mesure que le sel de thorium devenait plus pur, il perdait son pouvoir éclairant. La matière éclairante se trouvait dans les résidus. Auer put constater que cette matière était le cérium ; mais l'oxyde de cérium, employé seul, ne donnait pas non plus une bien vive lumière ; mélangé au contraire avec l'oxyde de thorium, il donnait de meilleurs résultats ; quand on prenait 1 p. 100 de cérium et 99 p. 100 de thorium, la lumière était alors éblouissante [1].

1. Le tableau suivant montre à quel point le pouvoir éclairant dépend des proportions relatives des deux oxydes :

Oxyde de thorium.	Oxyde de cérium.	Litres de gaz consommé par heure.	Pouvoir éclairant en bougies.
—	—	—	—
100	0	130	2,6
99,9	0,1	115	17
99,8	0,2	129	41
99,5	0,5	133	62
99,0	1	101	71
98,0	2	101	61
95,0	5	101	40
90,0	10	101	11
0	100	125	2

Le manchon Auer, qui devait révolutionner l'industrie du gaz, était trouvé : on était en 1891.

Une difficulté restait, et non la moindre : il fallait se procurer les précieux oxydes en quantité suffisante pour une exploitation industrielle. Le seul minerai alors exploité était l'orangite du fjord de Langesund, près d'Arendal; il coûtait mille francs le kilogramme, et il était à peu près impossible de s'en procurer plus de quinze kilogrammes à la fois.

On se souvint alors que certains sables d'alluvions, traités jadis aux États-Unis, dans les Carolines et l'Idaho, pour l'extraction de l'or, renfermaient des grains jaunes et lourds d'une substance appelée *monazite* et dans laquelle on avait signalé la présence du thorium. L'exploitation en fut aussitôt entreprise; les placers abandonnés reprirent une activité si fructueuse que la recherche des terrains monazités fut entreprise de tous côtés ; on découvrit des gisements très riches et très étendus dans plusieurs provinces du Brésil, en Australie, en Tasmanie; les monazites existent même en France, près du Puy, dans le lit du petit ruisseau qui passe à Saint-Christophe. Enfin, un autre minerai, la *thorianite*, qui renferme jusqu'à 80 p. 100 d'oxyde de thorium, était découvert à Ceylan.

Ainsi tous ces corps n'étaient rares que parce que nous ignorions leur existence : notre sol en renferme des quantités suffisantes pour une exploitation prolongée.

Aux États-Unis, les sables monazités se rencontrent dans le lit de petites rivières sorties des Montagnes Bleues ; ils y forment des couches qui n'ont guère d'autre largeur que celle du cours d'eau, sur une épaisseur de 50 à 60 centimètres ; la monazite, à cause de sa forte densité, s'accumule surtout dans le voisinage des sources. C'est là qu'on va la séparer des sables inactifs plus légers, par la méthode primitive qui servait jadis à en extraire les paillettes d'or. Un ouvrier verse le sable sur une rigole inclinée, ou *sluice*, parcourue par un courant d'eau, tandis qu'un aide agite constamment le mélange de sable et d'eau ; la monazite s'écoule, avec un peu d'or, par des trous percés dans le sluice ; le produit, recueilli et séché, passe ensuite entre des électro-aimants qui complètent le triage, en séparant les grains de monazite légèrement magnétiques du sable inerte et du fer titané et du grenat, dont le magnétisme est plus accentué.

C'est dans cet état que les monazites de l'Amérique du Nord sont livrées à l'industrie

chimique; la plupart d'entre elles sont traitées aux États-Unis par la *Welsbach Light C°*, qui en extrait les divers constituants par une série d'opérations d'autant plus longues que le manchon Auer exige des produits d'une grande pureté. Quant aux monazites brésiliennes, plus riches en thorium que les précédentes, elles sont en général, après un lavage sommaire, embarquées comme lest à bord des navires qui les transportent à Hambourg; elles sont traitées par les usines allemandes.

On conçoit que la mise en œuvre de semblables moyens industriels, opérant sur une production annuelle de monazite voisine de cinq mille tonnes, ait singulièrement modifié le prix des terres rares; en 1895, le kilogramme de thorium valait encore 2.250 francs; trois ans plus tard, le prix n'était plus que de 450 francs; il s'abaissait à 50 francs en 1903 et il a encore diminué depuis, non pas il est vrai par les progrès de la fabrication, mais par suite de la disparition d'un cartell des producteurs allemands.

Peu de temps après la grande découverte d'Auer, les terres rares qu'il venait d'appeler à la vie ont failli recevoir une nouvelle application. Tout le monde a connu la lampe Nernst et

admiré la lumière éblouissante qu'émet son bâtonnet d'oxyde échauffé par le courant électrique. Ce bâtonnet, fait primitivement en magnésie, fut ensuite fabriqué avec divers mélanges de terres rares[1]. Mais, hélas ! la lampe Nernst se meurt, étouffée par la double concurrence du manchon Auer et des nouvelles lampes électriques à filament de tungstène, et c'est une chose assez triste que de voir une si belle invention, qui a coûté tant d'intelligence, d'activité laborieuse et de capitaux, disparaître ainsi en pleine jeunesse, sans avoir connu la plénitude du succès.

En tout cas, la science a grandement profité de la découverte d'Auer ; les terres rares, leurs métaux et leurs principaux sels sont aujourd'hui des produits courants que plusieurs fabriques livrent à l'état pur ; leur étude, autrefois si difficile, peut se continuer dans de meilleures conditions ; l'industrie a largement payé sa dette à la science.

1. Voici quelques-unes des compositions qui ont été employées :

OXYDES DE :	1	2	3	4	5	6
Zirconium	90	80	70	10		
Yttrium	10	10	30	10	10	17,5
Erbium		10		10	20	2
Thorium				70	70	80
Cérium						0,5

*
* *

Mais il était donné aux terres rares de quitter une fois de plus la paix du laboratoire et d'offrir à l'humanité l'agrément d'une de leurs plus curieuses propriétés ; c'est encore au génie d'Auer que nous devons cette nouvelle application.

La monazite renferme des quantités d'oxyde de thorium très variables, mais dont la proportion atteint rarement 10 p. 100 ; au contraire, la teneur en oxyde de cérium est, le plus souvent, supérieure à 50 p. 100 ; or on a vu que la préparation des manchons exigeait 99 fois plus du premier corps que du second ; il en résulte qu'après extraction du thorium, il reste un excès considérable de cérium, qui s'accumule inutilement dans les usines. Le cérium est donc un sous-produit inutilisé de cette industrie, et comme, dans toute exploitation bien comprise, rien ne doit être perdu, les chimistes se sont évertués depuis longtemps à en tirer parti ; on a proposé son utilisation en verrerie et en céramique, pour la coloration et le mordançage des étoffes ; Auer lui-même avait préconisé son emploi dans la fabrication des accumulateurs

électriques ; enfin MM. Lumière ont proposé l'emploi des sels cériques pour la photographie. Mais il n'était rien sorti de toutes ces tentatives et le cérium continuait à rester sans emploi, quand apparut le briquet au ferro-cérium, dont la fortune paraît devoir être durable.

On savait depuis longtemps que l'acier n'est pas le seul corps qui donne, par frottement contre un corps dur, des copeaux incandescents ; on connaissait un alliage de fer et d'antimoine qui, frotté contre une lime, dégage des gerbes d'étincelles et M. Chesneau avait montré, en 1896, que l'uranium, préparé par Moissan au four électrique, possède à un haut degré cette vertu pyrophorique, qu'on rencontre encore dans le thorium, le lanthane et d'autres métaux.

Mais l'abondance des étincelles n'est pas le point le plus important ; c'est leur température qu'il faut surtout considérer, car c'est d'elle que dépend la possibilité d'allumer des mélanges d'air et de gaz ou de vapeurs inflammables ; ainsi un mélange de grisou et d'air ne s'enflamme que s'il est mis en contact avec un corps dont la température atteigne au moins mille degrés ; une température aussi élevée est nécessaire pour allumer le mélange combustible qui se forme au voisinage d'une mèche imbibée

d'essence. Or, quand on détache, à l'aide d'un silex, des copeaux d'acier, le frottement a pour effet de porter le métal au rouge ; il brûle alors dans l'air et c'est la chaleur dégagée dans cette réaction qui règle la température finale de la parcelle oxydée. Les corps dont l'oxydation dégage le plus de chaleur sont donc, *a priori*, ceux qui donnent les étincelles les plus chaudes ; les métaux des terres rares sont dans ce cas, avec l'uranium, le thorium et quelques autres ; il serait donc vain de rattacher à la radioactivité, comme on l'a fait parfois, une propriété dont l'explication est toute naturelle. Mais il ne suffit pas non plus de prendre le métal le plus oxydable pour avoir les étincelles les plus chaudes ; il y a des conditions de dureté, de ténacité qui règlent la formation du copeau métallique et qu'aucune théorie ne permet de prévoir.

Le cérium est par excellence un métal pyrophorique : il suffit de le gratter avec une épingle ou de le frotter avec une brosse métallique pour en tirer des étincelles très brillantes et très blanches, par conséquent très chaudes. Mais à l'état pur, il est trop mou et surtout il s'oxyde spontanément à l'air ; il faut donc l'allier avec un autre métal qui lui donne du corps et qui

assure sa conservation. Parmi les diverses compositions essayées jusqu'à présent[1], la meilleure paraît être le ferro-cérium proposé par Auer : il est constitué d'un tiers de fer pour deux tiers de cérium et les étincelles qu'il donne, par frottement contre une lime ou une petite roue dentée en acier, sont assez chaudes pour allumer un mélange d'air et d'essence vaporisée ; il permet donc d'obtenir directement une flamme, tandis que l'antique briquet à acier-silex donnait juste assez de chaleur pour mettre en combustion l'amadou, ou des mèches imprégnées de chromate ou d'azotate de plomb.

Tel est le principe du nouveau briquet qui se pose aujourd'hui en rival de l'allumette chimique. Au fond, malgré la différence d'aspect, les deux dispositifs fonctionnent de la même manière : un frottement préliminaire dégage, dans les deux cas, assez de chaleur pour amorcer une réaction chimique qui ne se produit pas à la température ordinaire ; cette réaction, qui est, pour l'allumette comme pour le briquet, une oxydation, élève assez la température pour enflammer un mélange d'air et de vapeurs combustibles. Le principe n'est donc pas changé : le

1. On vient encore de breveter un alliage de cérium et de magnésium.

cérium s'est seulement substitué au phosphore et la vapeur d'essence a remplacé les gaz combustibles produits par le bois, la paraffine ou la cire.

Les brevets d'Auer sont actuellement exploités par la Pyrophor-Metallgesellschaft de Cologne qui livre au commerce, sous forme de bâtonnets ou de petits cubes, le précieux alliage. Celui-ci, qui ne revient pas à plus de 60 francs le kilogramme, est vendu environ 300 francs. Comme chaque gramme de matière permet d'obtenir deux à trois mille allumages, on voit qu'un centime représente le prix de cent allumages. Il est vrai qu'on néglige, dans ce calcul, le prix de l'essence dépensée ; mais ce prix est très modique, et le briquet pyrophorique serait, dès à présent, en état de faire aux allumettes chimiques une concurrence victorieuse, si de lourdes taxes n'avaient pas, en France tout au moins, rendu la lutte inégale. Ces moyens artificiels peuvent bien retarder les effets de la découverte : ils n'en changeront pas les résultats derniers ; pas plus que la bougie et la lampe à pétrole n'ont disparu devant la lumière électrique, l'allumette ne disparaîtra pas devant le briquet ; mais elle laissera une large place à un mode d'allumage plus économique, plus hygiénique et plus propre.

Ainsi, le manchon Auer, la lampe Nernst, le briquet pyrophorique : voilà ce qu'il y avait en puissance dans les modestes échantillons minéralogiques qui ont usé la vie de tant de savants. Nous ne sommes qu'au début : quinze éléments nouveaux entrent dans la chimie, avec toute la lignée de leurs sels et de leurs combinaisons ; c'est un formidable accroissement des énergies naturelles à la disposition de l'humanité ; c'est aussi tout bénéfice pour l'esprit humain, qui découvre de nouveaux aspects dans la variété infinie de l'univers.

LES GAZ CACHÉS
DE L'ATMOSPHÈRE

LES GAZ CACHÉS
DE L'ATMOSPHÈRE

Il y a trente ans, aucun problème de chimie n'était, en apparence, aussi clairement élucidé que l'étude de l'atmosphère. Les expériences de Lavoisier avaient anéanti toutes les vaines hypothèses ; les analyses, faites dans les conditions les plus variées et par les plus habiles chimistes, avaient établi la constance presque rigoureuse de la composition de l'air : quatre cinquièmes en volume d'azote, avec un cinquième d'oxygène et, s'ajoutant au mélange, des quantités variables de vapeur d'eau et de gaz carbonique et des traces infinitésimales de presque tous les gaz connus, hydrogène, ammoniac, formène. Comme l'azote et l'oxygène sont des gaz de tout repos, connus à fond et étudiés, depuis que la chimie est une science, dans leurs moindres propriétés, il ne semblait pas qu'il

restât la moindre place pour l'erreur ou l'omission... Or, cinq gaz inconnus se dissimulaient dans l'atmosphère, cinq éléments nouveaux qui forment aujourd'hui une des séries les plus homogènes de la classification chimique. L'histoire de cette découverte nous montre, une fois de plus, que les grands progrès scientifiques résultent de la collaboration du hasard et du « flair » merveilleux qui caractérise les savants de génie.

*
* *

En 1882, le grand physicien anglais Lord Rayleigh mettait en train un travail de haute précision et de longue haleine sur les densités de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote ; il cherchait à déterminer par des moyens purement physiques les poids atomiques, rapportés à l'hydrogène, de quelques éléments et à voir si ces poids s'exprimaient par des nombres simples, 16 pour l'oxygène, 14 pour l'azote [1]. Pour plus de sûreté, Lord Rayleigh opérait sur de l'azote extrait successivement de l'atmosphère et de différents composés chimiques ; ses méthodes

1. On sait, en effet, que le poids atomique de ces gaz est égal à leur densité par rapport à l'hydrogène.

étaient assez précises pour qu'il pût répondre du dix-millième dans la mesure des densités. Or, il se trouva que l' « azote atmosphérique » était régulièrement plus lourd d'un deux-centième que l' « azote chimique ». Le fait en lui-même paraissait d'un médiocre intérêt, et un chimiste ordinaire se fût contenté de le signaler en passant ; mais Lord Rayleigh était sûr de ses nombres et il s'obstina à chercher le mot de l'énigme. Diverses hypothèses étaient vraisemblables, qui furent toutes, à l'user, reconnues fausses. En désespoir de cause, l'éminent physicien fit appel, par une lettre adressée au journal scientifique *Nature*, à tous les chimistes pour trouver la raison de cette troublante anomalie.

Cette lettre resta sans réponse jusqu'au moment où Ramsay demanda et obtint la permission de faire des recherches sur le même sujet. Ramsay apportait une idée neuve ; il avait remarqué, quelques années auparavant, que le magnésium en poudre absorbait l'azote à chaud en formant un azoture ; il utilisa cette observation en faisant passer de l'azote atmosphérique dans un tube contenant du magnésium chauffé au rouge ; la première expérience, effectuée en mai 1894, lui montra que la densité de l'azote avait augmenté par cette opération ; au lieu

d'être quatorze fois plus lourd que l'hydrogène, il était devenu quinze fois plus pesant.

Encouragé par ce premier résultat, Ramsay prit une masse déterminée d'azote atmosphérique, l'enferma dans un appareil formé par deux réservoirs que séparait un tube à magnésium et le fit passer alternativement, pendant dix jours, d'un réservoir à l'autre. Au bout de ce temps, il ne restait plus qu'un quatre-vingtième du gaz primitif et ce résidu était 16,1 fois plus lourd que l'hydrogène ; de nouvelles rectifications amenèrent la densité à 19. Ramsay croyait, à ce moment-là, que le résidu isolé était une sorte d'ozone de l'azote, c'est-à-dire qu'il était formé par une condensation de trois atomes d'azote en une seule molécule, tandis que la molécule normale d'azote est formée de deux atomes. Mais l'analyse spectrale vint changer sa manière de voir : le gaz en question donnait, outre les raies et les bandes caractéristiques de l'azote, un certain nombre de lignes rouges et vertes qui n'appartenait à aucun gaz connu.

Cependant, Lord Rayleigh continuait ses recherches, et il arrivait au même point en reprenant l'expérience classique de Cavendish, c'est-à-dire en combinant l'azote atmosphérique avec l'oxygène, en présence d'une solution de soude,

sous l'action répétée des étincelles électriques. Il se forme, dans ces conditions, de l'azotate de soude, et l'azote est progressivement éliminé; mais on ne peut jamais absorber la totalité du gaz inerte et il reste un résidu gazeux, que Cavendish avait déjà obtenu cent ans auparavant; ce résidu donne les raies étrangères à l'azote, observées par Ramsay. Les deux savants anglais, parvenus au même point, unirent alors leurs efforts et ils purent annoncer au meeting de l'Association Britannique, tenu à Oxford en août 1895, l'existence d'un gaz nouveau, une fois et demie aussi lourd que l'azote et qui forme un centième environ de notre atmosphère.

Comme l'humour britannique ne perd jamais ses droits, un assistant du meeting d'Oxford demanda si le nom du nouvel élément avait aussi été découvert; on put répondre que les deux parrains du nouveau-né l'avaient appelé *argon*, du grec ἄργον, qui signifie paresseux. On savait déjà, en effet, que sa propriété caractéristique était l'absence de toute propriété chimique. On lui a présenté en vain, dans les conditions les plus engageantes, les corps les plus appétissants de la Chimie; il a toujours dédaigné leurs avances; et la Nature, cette habile faiseuse d'unions, n'a pas été plus heureuse, avec toute

sa souplesse, que les chimistes avec leurs procédés brutaux ; on n'a trouvé aucune trace du nouveau gaz en analysant divers végétaux ; de même, des souris, desséchées et soumises à l'analyse, contenaient 1 p. 100 de leurs poids d'azote, mais pas d'argon. L'argon est donc un *résidu*, et on ne peut l'obtenir qu'en éliminant successivement tous les autres gaz.

Pour cette opération, les méthodes chimiques ne sont pas les meilleures ; M. Georges Claude a montré récemment que l'air liquide était une mine d'argon bien plus facile à exploiter que l'atmosphère gazeuse. Si on abandonne un ballon plein de cet air liquéfié à l'évaporation spontanée, l'azote retourne le premier à l'atmosphère et laisse un résidu formé presque en totalité d'oxygène, mélangé à 3 ou 4 p. 100 d'argon ; il est aisé d'extraire l'argon de ce mélange, en absorbant l'oxygène par un moyen quelconque, tandis que l'élimination de l'azote est une opération très pénible.

*
* *

Le hasard heureux qui avait mis Ramsay et Lord Rayleigh sur la trace de l'argon devait se renouveler à propos de l'hélium. On sait que

M. Janssen, en observant la chromosphère au spectroscope à l'occasion de l'éclipse totale de 1868, y découvrit une raie jaune, qui fut d'abord rapportée à l'hydrogène, mais que MM. Frankland et Lockyer attribuèrent ensuite à un élément, alors inconnu, qu'ils dénommèrent *hélium ;* le spectre global de l'hélium contenait d'ailleurs, outre cette raie jaune, un assez grand nombre de radiations rouges, vertes et violettes. L'hélium conserva pourtant son caractère hypothéthique jusqu'au jour où M. Hillebrand, minéralogiste du Bureau géologique de Washington, constata qu'un grand nombre de minéraux uranifères, chauffés au rouge ou traités par l'acide sulfurique, laissaient échapper un gaz qu'il prit pour de l'azote. En particulier, un minerai rapporté du Groenland par Nordenskjœld, la clévéite, fournissait un rendement notable de ce gaz.

Ramsay cherchait à ce moment à réaliser des combinaisons de l'argon ; aussi crut-il devoir reprendre les recherches d'Hillebrand, avec la pensée de mettre la main sur quelque composé naturel de ce corps, décomposable par la chaleur ou les acides. Mais les gaz dégagés ne donnèrent point le spectre de l'argon ; on y trouvait, en revanche, la fameuse raie jaune et l'ensemble

des radiations qui caractérisent l'hélium. C'est ainsi que le nouveau gaz fit, pour la première fois, son entrée dans les laboratoires. L'étude des corps radioactifs devait bientôt montrer sa grande diffusion et faire de lui le terme de toutes les désintégrations. On trouvait l'hélium dans certaines eaux thermales, comme celles de Bath, de Cauterets, de Bourbon-l'Archambault; enfin sa présence était signalée dans l'atmosphère, à dose, il est vrai, très minime. On parvint à l'isoler et à étudier ses propriétés. Comme l'argon, l'hélium est un gaz parfaitement inerte au point de vue chimique, et s'il existe dans les roches radioactives, ce n'est qu'à l'état d'inclusion ou de dissolution. Presque aussi léger que l'hydrogène, il est, de tous les gaz, celui dont la liquéfaction est la plus difficile; pourtant le savant hollandais Kamerlingh Onnes a pu, tout récemment, l'amener à l'état liquide; en le faisant évaporer dans le vide, il a atteint la température de — 271°,5 ; c'est la plus basse qui ait été réalisée jusqu'ici, et elle n'est éloignée que d'un degré et demi du *zéro absolu* de température, fixé par les physiciens à 273 degrés au-dessous de zéro.

Après le double hasard qui lui a livré l'argon

et l'hélium, Ramsay juge que c'est assez aller à l'aventure ; la table périodique de Mendeleef va lui servir de fil conducteur, et il sait au moins ce qu'il cherche, s'il ne sait pas où le trouver. Mendeleef a montré que, si on classe les corps simples suivant l'ordre croissant de leurs poids atomiques, on trouve, dans chaque colonne, des familles naturelles dont les éléments présentent d'étroites analogies. Écrivons, comme suit, les débuts de cette table périodique, en inscrivant, à côté de chaque élément, son poids atomique :

Hydrogène.	(1)	Hélium . .	(4)	Lithium. .	(7)
Fluor. . .	(19)	?		Sodium . .	(23)
Chlore . .	(35,5)	Argon. . .	(40)	Potassium.	(39)
Brome . .	(80)	?		Rubidium .	(85)
Iode . . .	(127)	?		Cœsium . .	(133)

La colonne de gauche, qui s'étend de l'hydrogène à l'iode, renferme le groupe naturel des *halogènes*, dont les éléments présentent un ensemble remarquable de traits communs et des propriétés qui varient progressivement avec les poids atomiques ; la colonne de droite renferme les *métaux alcalins*, c'est-à-dire une des familles les plus unies de toute la chimie ; nous devons donc nous attendre à rencontrer trois autres éléments dans la colonne où sont déjà inscrits l'hélium et l'argon. Ces éléments doivent avoir

des poids atomiques voisins de 20, de 82 et de 130, c'est-à-dire intermédiaires entre ceux des corps situés avec eux sur une même ligne horizontale. Leurs densités à l'état gazeux, qui sont proportionnelles à ces poids atomiques, sont donc connues approximativement. Tous ces corps sont monoatomiques, comme l'argon et l'hélium ; autrement dit, leur molécule ne comprend qu'un seul atome ; enfin, puisqu'ils forment avec les deux gaz déjà isolés une même famille naturelle, on doit s'attendre à ce que ces divers corps aient des activités chimiques nulles, ou du moins très émoussées.

Telles sont les données sur lesquelles Ramsay allait s'engager à la poursuite de ces corps hypothétiques ; il avait leur signalement approximatif ; mais comme il ignorait leur refuge, l'Univers entier se présentait à ses investigations. Pour opérer rationnellement, il fit l'hypothèse, assez vraisemblable *a priori*, que les éléments inconnus devraient se trouver associés à l'hélium, puisque l'analogie de leurs propriétés devait leur avoir assuré des destinées analogues. Ramsay, aidé du minéralogiste Collie, chauffa successivement une centaine de minéraux, choisis parmi les plus typiques des collections du British Museum. Sur ce nombre, une

vingtaine dégagèrent de l'hélium, un seul donna un mélange d'hélium et d'argon ; c'étaient tous des minéraux radioactifs. Après ce premier insuccès, les météorites furent étudiés à leur tour ; divers échantillons, soumis au même traitement que les minéraux, donnèrent de l'hydrogène et des carbures gazeux ; une seule pierre du ciel fournit de l'hélium et de l'argon. Puis ce fut le tour des eaux minérales ; on y trouva encore les deux gaz, mais aucun élément nouveau. Enfin, certaines observations ayant porté à croire que l'hélium était un mélange complexe, Ramsay essaya d'y séparer des éléments différents par diffusion à travers une cloison poreuse : on sait, en effet, que dans une semblabe opération, les gaz légers traversent la cloison plus rapidement que les gaz lourds, ce qui permet, par une méthode purement physique, d'obtenir la séparation approximative des éléments mélangés ; les résultats furent encore négatifs.

Tant d'insuccès ne découragèrent pas l'illustre savant. Comme il le fait remarquer lui-même, il avait imité ces gens qui cherchent bien longtemps leurs lunettes, sans s'apercevoir qu'ils les portent sur le front ; ce n'était pas, en effet, parmi les matériaux les plus rares de la Nature qu'il fallait aller chercher les éléments nou-

veaux ; ils existaient dans son propre laboratoire et remplissaient, sans qu'il s'en doutât, toutes ses fioles et tous ses ballons ; c'est dans l'atmosphère, où Ramsay avait déjà trouvé l'argon, qu'il allait les isoler à leur tour.

Par bonheur à ce moment-là, Hampson en Angleterre et Linde en Allemagne étaient parvenus, presque simultanément, à liquéfier l'air d'une façon industrielle. Ramsay pouvait disposer d'un appareil Hampson qui fournissait, par heure, un litre et demi d'air liquide ; il prit donc un litre de cet air et en laissa évaporer la plus grande partie ; la dernière goutte lui donna un litre de gaz qui fut recueilli ; ce résidu avait une densité supérieure à celle de l'argon, qui en formait pourtant la majeure partie ; de plus, introduit dans un tube de Geissler et soumis à l'action de la décharge électrique, il donnait un spectre où deux raies, l'une verte, l'autre jaune, s'imposaient à l'attention par leur extraordinaire intensité. On se trouvait donc en présence d'un gaz nouveau ; il reçut le nom de *krypton*, qui signifie « caché » ; isolé peu après à l'état pur, il trouva tout naturellement sa place dans la table de Mendeleef, au-dessous de l'argon, entre le brome et le rubidium. Inerte et monoatomique comme ses deux compagnons déjà découverts,

il avait une densité double de celle de l'argon, qui lui assignait un poids atomique égal à 81.

Sur ces entrefaites, M. Travers, collaborateur de Ramsay, avait extrait de l'atmosphère une grande quantité d'argon, soit quinze litres environ. Ce gaz fut liquéfié au moyen de l'air liquide, puis soumis à une distillation pendant laquelle on mit à part la tête et la queue. Les produits de tête, qui étaient naturellement les plus volatils, se trouvèrent avoir une densité un peu plus faible que celle de l'argon ; on pouvait donc y soupçonner la présence d'un gaz léger ; de fait, en les introduisant dans un tube de Geissler, on eut la surprise de voir apparaître un magnifique spectre de raies, s'étendant sur le rouge et l'orangé, qui donnait une lumière intense couleur de feu. C'est ainsi que fut découvert le « nouveau » gaz, le *néon ;* ses propriétés, étudiées plus tard à loisir, le placèrent, sans doute possible, entre l'hélium et l'argon, avec un poids atomique égal à 20.

Pour obtenir, à l'état pur, les gaz nouvellement découverts, Ramsay et Travers eurent recours à la distillation fractionnée : les mélanges impurs, liquéfiés à nouveau, étaient soumis à une lente évaporation, pendant laquelle on séparait les parties les plus volatiles des élé-

ments plus fixes ; mais la rectification complète du néon ne put s'effectuer qu'en refroidissant par l'hydrogène liquide, qui amena le néon sous la forme d'un solide blanc, en laissant un résidu gazeux d'hélium. C'est donc dans cette opération que l'hélium fut, pour la première fois, extrait directement de l'atmosphère.

La purification du krypton, poursuivie suivant les mêmes méthodes, donna pendant longtemps des résultats incertains et déconcertants. Le krypton, examiné au spectroscope, paraissait pur ; pourtant sa densité était variable. Il fallut le solidifier pour obtenir la clef de l'énigme ; on obtint un solide blanc, dont l'évaporation, conduite avec lenteur, donna d'abord du krypton, puis un résidu impur où l'analyse spectrale montra de nombreuses lignes nouvelles, spécialement dans le vert et le bleu : le gaz « étranger », le *xénon*, venait d'apparaître pour la première fois aux chimistes anglais. L'étude de ce nouveau gaz, faite ultérieurement, l'a encore placé dans la série des corps monoatomiques, au-dessous du krypton, avec un poids atomique, 128, intermédiaire entre ceux de l'iode et du cœsium.

La table de Mendeleef se trouve ainsi complétée, du moins en apparence, car rien n'empêche

que les colonnes verticales qui la constituent ne se continuent par en bas, c'est-à-dire qu'il n'existe des éléments dont l'atome soit encore plus lourd que celui du xénon. Il est probable, dès à présent, que l'émanation du radium, désignée par Ramsay sous le nom de *niton*[1], appartient à la même série de corps monoatomiques et chimiquement inactifs, avec un poids atomique égal à 222,4. Dans le même temps où ils découvraient les compagnons de l'argon, c'est-à-dire entre 1896 et 1898, Ramsay et Travers crurent bien avoir isolé un autre élément, le *métargon*, mais ils reconnurent dans la suite que ce corps n'était que de l'argon souillé par les vapeurs de certains composés de carbone. Enfin, l'étude spectroscopique de la couronne solaire révèle l'existence de raies, d'origine inconnue, qu'on a mises au compte d'un élément de la haute atmosphère solaire, désigné sous le nom de *coronium*. MM. Liveing et Dewar, en faisant passer de l'air dans un récipient refroidi par l'hydrogène liquide et en recueillant dans un tube de Geissler les parties non condensées, obtinrent un spectre dont les lignes appartenaient, pour la plupart, à l'hélium, mais où cer-

1. C'est-à-dire « le brillant » ; on sait, en effet, que l'émanation du radium est lumineuse spontanément.

taines raies semblaient identiques à celles du coronium. Toutefois, ce résultat ne paraît pas avoir été confirmé, et l'existence du coronium dans notre atmosphère reste encore hypothétique.

*
* *

La technique suivie par les chimistes anglais était longue et ne donnait les nouveaux gaz qu'en quantités très faibles : sir W. Ramsay, six ans après leur découverte, ne possédait que 20 centimètres cubes de néon, 10 de krypton, 4 de xénon. Grâce à l'ingéniosité de M. Georges Claude, cette situation s'est modifiée et les nouveaux éléments sont en train de devenir des produits courants, et même industriels, qu'on sait extraire de l'atmosphère, mine inépuisable, dans la mesure où ils sont nécessaires.

M. Claude a commencé par perfectionner les procédés de préparation de l'air liquide ; il l'a fait si judicieusement qu'au lieu de soumettre l'air à une compression préalable de deux cents atmosphères, on peut se contenter de l'amener à quarante atmosphères. Mais ce n'était qu'un début, et M. Claude a très bien compris que la liquéfaction de l'air devait être un moyen et non pas un but ; les applications immédiates de l'air

liquide sont insignifiantes et incapables d'entretenir une usine, même modeste. Le problème intéressant est la séparation des éléments de l'atmosphère par la distillation de cet air liquide ; en effet, la préparation économique de l'oxygène est, pour l'industrie, une question vitale ; ce gaz sert surtout, actuellement, au découpage et à la soudure autogène des métaux avec le chalumeau oxyacétylénique ; mais, si son prix devient assez bas, on pourra envisager des applications très importantes à la métallurgie, à l'éclairage et aux industries chimiques. Une telle perspective avait de quoi tenter un inventeur.

Après avoir posé nettement le problème, il restait à le résoudre. Pour faire comprendre, au moins dans ses grandes lignes, la méthode employée par M. Claude, imaginons d'abord qu'on abandonne à elle-même une certaine quantité d'air liquide ; l'azote plus volatil retournera le premier à l'atmosphère et le résidu liquide, de couleur bleue, est formé presque uniquement d'oxygène, qu'on pourra vaporiser à son tour ; la séparation des deux gaz essentiels de l'air s'est faite ainsi par des moyens purement physiques ; mais l'oxygène produit coûte très cher. Heureusement on peut faire beaucoup mieux : dans l'air liquide qui s'évapore, immergeons un

faisceau de tubes dans lesquels on comprime de l'air atmosphérique ; ce gaz étant vigoureusement refroidi, il suffit d'une très légère surpression pour l'amener à l'état liquide ; ainsi, l'évaporation du liquide extérieur régénère, à l'intérieur des tubes, une quantité de liquide qui, en théorie, pourrait lui être rigoureusement égale ; la pratique souffre évidemment un certain déchet ; toutefois, les choses sont si bien réglées dans les appareils actuels que trente litres d'air liquide, après évaporation, en restituent plus de vingt-neuf à l'intérieur du système tubulaire.

Dès lors, l'économie du procédé se comprend aisément : puisque l'évaporation laisse échapper l'azote d'abord, l'oxygène ensuite, nous pouvons recueillir successivement et séparément ces deux gaz et, si l'azote est sans intérêt, mettre à part l'oxygène. Le froid produit par cette évaporation a régénéré une quantité presque égale d'air liquide. Nous pouvons admettre celui-ci à son tour dans le récipient extérieur et l'évaporer méthodiquement, en mettant à part l'oxygène ; une nouvelle masse d'air liquide est condensée dans les tubes intérieurs et l'opération peut ainsi se continuer indéfiniment, à condition de combler le déchet d'air liquide grâce à un appoint, obtenu par la détente d'une masse

d'air supplémentaire. On conçoit donc que la séparation des deux constituants essentiels de l'air puisse être effectuée, par l'intermédiaire de l'état liquide, avec une réelle économie ; l'opération exige seulement une première dépense de froid qui sert ensuite, avec un léger appoint, à l'entretien permanent des basses températures dans l'appareil. De même, l'affineur qui sépare les métaux précieux de leurs divers alliages a besoin d'une première mise de fonds, après quoi la production d'or et d'argent fin couvrira la dépense qu'il est obligé de faire pour ses nouveaux achats.

Tel est le principe de la méthode, imaginée en 1892 par l'Anglais Parkinson et que M. Claude a portée à un haut degré de perfection. L'économie atteinte est telle que, en installant l'usine d'air liquide à proximité de hauts fourneaux, dont les gaz combustibles fournissent gratuitement la force motrice, on peut obtenir l'oxygène gazeux au prix de trois centimes le mètre cube, soit de vingt francs la tonne. C'est, comme le remarque M. Claude, le prix de vente du sable ou des cailloux ! Et nous assisterons bientôt, dans les pays métallurgiques, à cet accouplement extraordinaire du chaud et du froid, du haut fourneau et de la machine à air liquide, la

seconde ne servant qu'à extraire l'oxygène qu'elle insuffle ensuite dans les poumons du monstre pour réchauffer encore son ardeur et accélérer sa rage laborieuse.

Mais laissons de côté ces applications industrielles. M. Claude a pensé que les principes qui permettaient de séparer l'oxygène de l'azote pouvaient aussi bien s'appliquer à tous les gaz de l'air et en rendre la séparation méthodique et continue. L'appareil qu'il a combiné à cet effet et qu'il a présenté, en 1909, aux physiciens, réalise un progrès considérable dans l'isolement des gaz rares. Cet appareil traite, par heure, cinquante mètres cubes d'air qui traversent l'état liquide pour se vaporiser ensuite méthodiquement ; un jeu, d'ailleurs assez compliqué, de tubes et de vannes assure la circulation des gaz dans des enceintes dont la température est comprise entre — 184°, celle de l'oxygène liquide sous la pression atmosphérique, et celle, — 195°, de l'azote liquide ; on obtient finalement, après élimination des gaz fondamentaux, un mélange presque pur de néon, d'hydrogène et d'hélium que l'appareil fournit, d'une façon continue, à raison d'un litre à l'heure. Pour achever la séparation de ces trois gaz, il faut avoir recours à l'hydrogène liquide, et c'est une

opération qui se fait sans difficulté. Quant au krypton et au xénon, ils s'accumulent peu à peu dans un cul-de-sac, où on les retrouve en totalité, à raison d'un litre environ de krypton et de dix centimètres cubes de xénon par jour ; ils sont d'ailleurs mélangés à de l'oxygène et à des vapeurs de l'éther de pétrole employé pour le graissage de la machine, mais il n'est pas difficile de les isoler à l'état pur.

Nous sommes donc en possession d'une machine qui extrait automatiquement les gaz résiduels de l'atmosphère ; l'étude de ces corps en sera grandement facilitée. Un exemple donné par M. Claude permettra de se rendre compte de l'intérêt de ce résultat : nous avons vu que Sir William Ramsay avait pu rassembler, à grand-peine, quelques centimètres cubes de néon par l'ancien procédé de la distillation fractionnée ; à sa demande, M. Claude lui en envoya dix litres et il put, tout aussi aisément, en adresser deux cent cinquante au professeur Kamerlingh Onnes, qui se proposait de continuer avec ce gaz ses remarquables recherches sur les basses températures.

L'intérêt de ces recherches sur les gaz rares s'affirme de jour en jour. Le krypton, malgré son extrême dilution dans l'air, est le gaz des

aurores boréales, c'est-à-dire que ses raies prédominent dans le spectre de l'aurore ; la science aura donc à expliquer pourquoi l'illumination électrique de la haute atmosphère est due presque exclusivement à un gaz lourd, qui n'entre dans sa constitution que pour un millionième. Quant au néon, la richesse de son spectre et la lumière dorée qu'il émet sous l'action des décharges électriques, attirent en ce moment l'attention générale. La lampe au néon, que M. Claude étudie industriellement, a déjà figuré dans plusieurs expositions et sa destinée est peut-être de révolutionner les procédés modernes de l'éclairage.

*
* *

Un mètre cube d'air (c'est-à-dire un million de centimètres cubes) renferme, en moyenne :

780.500	centimètres cubes	d'azote.
208.000	—	d'oxygène.
9.370	—	d'argon.
10	—	de néon.
1	centimètre cube	d'hélium.
1	—	de krypton.
0,05	—	de xénon.

Les nouveaux gaz sont donc, après tout,

moins rares qu'on le croit communément : dans l'air d'un salon carré de cinq mètres de côté et quatre mètres de hauteur, il y a un mètre cube d'argon, un litre de néon, assez d'hélium et de krypton pour remplir deux verres à bordeaux, et du xénon plein un dé à coudre. Notre atmosphère renferme, bien entendu, d'autres éléments, acide carbonique, vapeur d'eau, ammoniaque, oxyde de carbone, carbures d'hydrogène, etc. Tout ce qui est volatil et même tout ce qui peut être réduit en poussière, tous les produits des décompositions et des fermentations, toutes les fumées des usines s'en vont pêle-mêle à l'atmosphère ; mais il y a encore un élément dont la présence constante mérite d'être signalée, c'est l'hydrogène. Qu'il existe de l'hydrogène dans l'air, il n'y a pas lieu de s'en étonner ; toutes les putréfactions en dégagent ; les volcans en vomissent des torrents, produits sans doute par une réaction des eaux souterraines sur les granites surchauffés. Ce qui doit plutôt nous étonner, c'est qu'il y en ait si peu. Les analyses de M. Armand Gautier faites au large de Paimpol, sur de l'air venu de l'Atlantique avec les grands vents de l'équinoxe d'automne, donnent une moyenne de 130 centimètres cubes d'hydrogène par mètre cube.

Quand l'humanité sera devenue plus savante, elle pourra peut-être aborder l'histoire de cette atmosphère et expliquer les transformations qu'elle a subies depuis l'instant initial où la terre s'est isolée de la nébuleuse primitive ; dès à présent, nous pouvons soupçonner le sens de certaines transformations. Il est clair que, parmi les éléments gazeux à la température ordinaire, plusieurs ont disparu sous forme de combinaisons chimiques : tout le chlore a été transformé en chlorures, une grande partie de l'oxygène s'est condensée dans l'eau des mers et dans les silicates de la croûte terrestre, l'hydrogène a formé de l'eau et, comme il y avait un excès d'oxygène, il est naturel que tout l'hydrogène ait disparu. Les cinq gaz monoatomiques découverts par Ramsay ont dû, en raison de leur inertie chimique, conserver une teneur à peu près invariable ; peut-être cependant, le xénon s'est-il dissous dans l'eau des océans où il existerait à l'état stable dans les grandes profondeurs. Quant à l'azote, il a dû subsister presque intégralement à l'état gazeux, car ses affinités sont faibles et ses combinaisons, azotates et sels ammoniacaux, sont peu abondantes dans la nature. D'ailleurs, MM. Moureux et Lepape viennent de donner une preuve indirecte de cette inva-

riabilité de l'azote atmosphérique; ils ont analysé des minerais, des gaz d'eaux thermales, qui contiennent simultanément de l'argon et de l'azote. Dans tous les cas, le rapport des deux gaz s'est trouvé à peu près constant et, comme il est présumable que ces inclusions gazeuses remontent à des époques géologiques fort lointaines, elles nous apportent des témoignages précieux par leur concordance.

Tout ceci laisse subsister le problème de l'hélium. Comment se fait-il que ce gaz, dont l'analyse spectrale nous montre la diffusion et l'abondance dans l'univers, n'existe dans notre atmosphère qu'à l'état de traces? La proportion devrait pourtant s'en accroître, puisque, depuis des millions d'années, la désintégration des roches radioactives en rejette constamment dans l'air; la seule source de Bourbon-l'Archambault en dégage dix mille litres par an. Le docteur Johnstone Stoney a proposé une solution de ce problème qui, si elle n'est pas exacte, est au moins fort ingénieuse. Elle repose sur ce qu'on appelait autrefois la théorie cinétique des gaz, qu'on peut bien appeler aujourd'hui la « vérité cinétique » depuis les expériences de M. Perrin. Les molécules d'un gaz sont des projectiles, animés de vitesses d'autant plus grandes qu'elles

sont plus légères et que la température est plus élevée. A la température ordinaire, la vitesse des éléments de l'hydrogène atteint 1.800 mètres par seconde, celle de l'hélium 1.250 mètres, tandis que, dans les autres gaz, tous plus lourds, les déplacements moléculaires sont beaucoup moins rapides. Mais ce sont là des *vitesses moyennes;* dans les milliers de molécules qui s'entre-choquent, toutes les vitesses sont représentées et chaque molécule, bousculée par ces chocs, passe incessamment des unes aux autres.

Or, imaginez un boulet de canon, un bolide ou tout autre solide lancé verticalement à partir de la Terre ; à mesure qu'il s'éloigne du centre attractif, sa pesanteur diminue et, s'il a été lancé avec une vitesse suffisante, un moment vient où il échappe à l'action de la Terre et est saisi par celle, plus puissante, du Soleil ; c'est un problème très voisin que Jules Verne avait jadis traité de façon humoristique dans son roman *De la Terre à la Lune*. Le calcul montre qu'une vitesse de onze kilomètres par seconde suffit pour réaliser ce passage de la Terre au Soleil. Il existe certainement des molécules d'hélium dont la vitesse est égale, ou même supérieure à cette valeur critique ; elles seront donc captées par le Soleil, dont la force attrac-

tive est suffisante pour les fixer, puisque sa masse est trois cent mille fois plus grande que celle de la Terre.

Un raisonnement semblable s'applique, *a fortiori*, à l'hydrogène dont la vitesse moléculaire est supérieure à celle de l'hélium ; il suffit qu'il y ait des molécules dont la vitesse vaille six fois et demie la vitesse moyenne (et rien ne nous permet de douter qu'il en existe), pour que ces molécules s'échappent de notre atmosphère. Après leur départ, le jeu incessant des conflits moléculaires communiquera, toujours dans la même proportion, cette vitesse critique à de nouvelles molécules, qui sont entraînées à leur tour, et la totalité de l'hydrogène s'enfuira peu à peu. Ainsi, malgré les causes nombreuses qui déversent l'hydrogène dans notre atmosphère, ce gaz n'y peut pas, plus que l'hélium, subsister à l'état stable.

L'hypothèse de Johnstone Stoney s'applique à la Lune encore mieux qu'à la terre. En admettant que notre satellite ait eu jadis une atmosphère, il est trop près de nous et sa masse est trop faible pour qu'il ait pu la conserver ; les gaz les plus lourds eux-mêmes se sont détachés de lui pour venir se rassembler autour de notre globe. C'est là un des plus noirs méfaits de l'at-

traction universelle : en dérobant à la Lune son vêtement gazeux, nous l'avons abandonnée toute nue aux embrasements du Soleil et aux froids de l'Espace ; nous l'avons condamnée, par avance, à ne point connaître la Vie.

LE CYCLE DE L'AZOTE

LE CYCLE DE L'AZOTE

Il y a des corps qui valent mieux que leur réputation ; l'azote est resté, pour de nombreuses générations, le prototype de l'indolence : indifférent et sans affinités chimiques déterminées ; avec cela, inodore, incolore, insipide, tel était le signalement répété dans tous les traités de chimie ; on citait bien quelques rares corps, le bore, le magnésium, qui consentaient à s'allier avec l'azote grâce à la complicité d'une température élevée, mais ces exceptions ne faisaient que confirmer la règle.

Ceci s'applique à l'azote libre qui forme les quatre cinquièmes de notre atmosphère, mais il existe encore, dans le sol même de la terre, des quantités considérables d'azote combiné : associé à l'hydrogène, ce corps forme l'ammoniaque et toute la série des sels ammoniacaux ; uni, en proportions variables, à l'oxygène, il donne les nitrites, les nitrates, qu'on voit apparaître en

efflorescences salines, à la surface des murs humides, et qui forment, au Chili, des assises épaisses de plusieurs mètres, étendues sur plusieurs milliers de kilomètres carrés; enfin, l'azote apparaît comme un des éléments fondamentaux de la matière vivante : il entre dans la constitution des tissus, il se plie aux transformations incessantes qui accompagnent la vie. Il faut avouer qu'aucun nom n'était plus mal choisi que celui d'azote, pour désigner un corps qui joue dans la vie un rôle aussi actif; c'est lui pourtant qui a prévalu en France, grâce à l'autorité de Lavoisier, sur le nom de *nitrogène*, proposé par Chaptal; mais on baptise les éléments, comme les enfants, sans savoir ce qu'ils seront plus tard, et la chose n'a pas plus d'importance dans un cas que dans l'autre.

On dirait donc qu'il existe dans la nature deux espèces d'azote, dont l'un, indifférent à la vie, ne sert qu'à diluer l'oxygène atmosphérique, tandis que l'autre est le courtier le plus actif de toutes les transformations vitales; rien n'est plus intéressant que de suivre ce dernier dans ses migrations successives et de parcourir ce qu'on appelle souvent le « cycle de l'azote ». Voyez, par exemple, l'herbe qui pousse, au printemps, dans nos prairies; elle renferme, sous des formes

variées, de l'azote qui constitue quelques centièmes de son poids ; broutée par les vaches ou par les brebis, elle fournit les principes azotés du lait et de la viande, qui servent à l'alimentation de l'homme et des animaux carnivores ; ces principes sont finalement éliminés sous des formes multiples, dont la plus abondante est l'urée. A ce moment intervient l'œuvre des infiniment petits « sans lesquels, a dit Pasteur, la vie deviendrait impossible, parce que l'œuvre de la mort serait incomplète » ; c'est d'abord une légion de microorganismes, les uns aérobies, les autres anaérobies (c'est-dire vivant au contact ou à l'abri de l'air), qui triturent ces divers résidus azotés, les démolissent et donnent, comme produit principal, de l'ammoniaque ; tous ces microbes existent normalement dans le sol ; le plus important, que les bactériologistes allemands nomment l'*Erde Bacillus* ou bacille de la terre, exige, pour son développement, la présence de l'air, et c'est pour cette raison que la fermentation ammoniacale se produit avec plus de facilité dans les sols légers et bien aérés.

Mais ceci n'est qu'une première étape. MM. Schlœsing et Müntz ont montré, dans un travail resté célèbre, que l'ammoniaque subit à son tour un nouvel avatar ; au bout de cinq à six

jours, on voit apparaître dans les sels ammoniacaux un organisme ovale, un peu fusiforme, qui se meut avec une extrême agilité; il vit aux dépens des carbonates dissous dans le liquide, de l'oxygène de l'air et de l'ammoniaque et son activité laisse l'azote sous forme de nitrites; c'est le *ferment nitreux* isolé pour la première fois par Winogradsky; lorsque tout l'ammoniaque a été transformé en nitrite, cet organisme disparaît d'un milieu où la vie lui devient impossible ; mais on voit alors apparaître une nouvelle escouade d'ouvriers : ce sont des bactéries, c'est-à-dire des microbes en forme de bâtonnets, qui achèvent l'oxydation et laissent un résidu définitif d'azotates. Ainsi, le ferment nitrique a achevé l'œuvre de reconstruction; en effet, les nitrates sont un des éléments privilégiés de la plante; ils passent directement dans la sève brute et sont transformés, dans le végétal lui-même, en une variété infinie de produits organiques azotés ; le cycle de l'azote s'est fermé, et il pourra, dans la suite des siècles, être parcouru indéfiniment.

Cette manière d'envisager les choses comporte une première conséquence ; elle nous montre que si nous avons besoin d'azote combiné, c'est dans le cycle vital de l'azote qu'il faut aller

le chercher, et l'expérience des siècles passés confirme cette manière de voir : l'ammoniaque utilisée par l'industrie ou par l'agriculture provient presque tout entière de la distillation de la houille, c'est-à-dire d'un produit d'origine organique. Quant aux azotates, on sait qu'ils admettaient jusqu'ici comme unique origine les assises puissantes de nitrate de soude du Chili; or, bien que l'origine de ces formations soit encore assez obscure, la plupart des géologues les attribuent à une décomposition par le sel marin, de ce que Labiche appelait poliment des « inconvenances d'oiseaux »; l'azote américain aurait donc, lui aussi, une origine organique.

Tout ceci forme un ensemble assez séduisant ; mais en y regardant d'un peu près, on aperçoit les défauts du système : les prairies des Alpes donnent, chaque année, de l'azote combiné qu'elles ne revoient plus ; il s'en va, sous forme de viande ou de fromage, nourrir d'autres régions ; pourtant, à chaque printemps, l'herbe y pousse aussi belle et aussi drue, et les analyses du sol n'y trahissent aucun appauvrissement en azote : la terre des pâturages alpestres renferme même jusqu'à 9 grammes d'azote combiné par kilogramme, proportion qui n'est jamais atteinte dans les terres labourées, même les plus copieu-

sement fumées. Cette simple remarque suffit pour montrer que tout ne s'explique pas par la circulation indéfinie d'une quantité fixe d'azote, puisque certains sols fournissent, depuis des siècles, de l'azote combiné sans en recevoir et sans s'appauvrir. Quelle est donc l'origine de cet azote surnuméraire qui rétablit l'équilibre? Agronomes et chimistes discutaient depuis cinquante ans sur ce point, sans s'entendre, lorsque Berthelot, avec son clair génie, intervint dans le débat; il dosait tous les mois la teneur en azote d'une terre sablonneuse de Meudon, et il constatait qu'à chaque nouvelle analyse, cette proportion allait en croissant; mais si l'échantillon de terre avait été chauffé un peu au-dessus de 100 degrés, il perdait la propriété de gagner de l'azote. La conséquence qui se dégage de là est bien claire : le gain d'azote ne peut provenir que de l'atmosphère ambiante, et ce corps doit être fixé dans le sol par des microorganismes, puisque la stérilisation du sol arrête cette fonction assimilatrice. Mais les savants d'alors, engagés dans des discussions alambiquées, avaient sans doute la cervelle un peu brouillée, car ils n'acceptèrent pas formellement et sans restrictions cette manière de voir. Pour les convaincre, il fallait frapper un second coup.

Un botaniste, M. Prillieux, avait constaté que les racines de la plupart des légumineuses portent des nodosités qui, examinées au microscope, apparaissent comme de véritables colonies microbiennes ; mais on avait alors la conviction que ce parasitisme ne pouvait qu'être nuisible, et la notion des « bons microbes » n'était guère entrée dans les esprits ; c'est alors que deux botanistes allemands, Hellriegel et Wilfarth, montrèrent que l'existence de ces nodosités était liée de très près à la prospérité de la plante : si on stérilise, par des précautions minutieuses, la graine et le terrain, la plante qui pousse ne présente pas les nodosités signalées par M. Prillieux, mais en même temps elle s'étiole bien vite et n'atteint jamais son développement normal ; si, au contraire, on introduit, après coup, dans le sol des fragments de nodosité empruntés à une plante ordinaire, le développement reprend tout son essor. L'expérience a été reprise et variée de cent façons, et il est établi aujourd'hui que les légumineuses constituent une association prospère, une *symbiose* comme disent les biologistes, avec une bactérie qui existe normalement dans le sol et à laquelle on donne le nom de *Bacterium radicole ;* cette bactérie, sans doute identique au microorganisme qui fixait

l'azote dans les expériences de Berthelot, s'installe sur les racines de la plante, qui lui fournit des éléments utiles à son existence et qui reçoit l'azote pris à l'atmosphère et entraîné dans le cycle de la vie. Ainsi s'explique la vieille remarque des agriculteurs, qui considèrent depuis longtemps les légumineuses comme une culture « améliorante » du sol destiné à recevoir des céréales ; ces plantes aident à la multiplication du bacille fixateur de l'azote, et par là, elles enrichissent l'humus en azote combiné ; une seule récolte peut ainsi fixer dans chaque hectare du sol 150 kilogrammes d'azote captés dans l'atmosphère ; on voit d'après cela que le travail assimilateur des bactéries pour toute la surface de la Terre, doit se chiffrer par des millions de tonnes.

L'importance de cette notion nouvelle est à la fois pratique et théorique. Elle a déjà permis des applications intéressantes, entre autres la culture du microbe fixateur sur une terre de composition spéciale. Ces cultures sont faites par Hellriegel et Wilfarth dans une véritable « usine à microbes », établie par eux à Elberfeld, et vendues ensuite aux agriculteurs qui les mélangent aux semences de luzerne ou de trèfle ; les précieuses nodosités se développent ainsi à

coup sûr; la récolte prend un développement normal et le terrain est colonisé à fond par les bacilles fixateurs de l'azote. En même temps, nos idées théoriques sont complètement transformées ; le fameux cycle vital est brisé et l'azote atmosphérique ne reste plus isolé et en dehors de la vie ; la nature elle-même nous apprend le moyen qu'elle emploie pour le faire pénétrer dans ce cycle et pour réaliser un équilibre bien plus stable que celui que nous avions imaginé tout d'abord ; il permet en effet de compenser l'appauvrissement local et les retours d'azote à l'atmosphère qui se produisent incessamment, tant par la combustion des substances organiques que par l'action d'autres ferments qui décomposent les produits azotés en dégageant de l'azote gazeux.

*
* *

La « faim d'azote » est une des caractéristiques de la société moderne; chaque jour voit s'accroître et se diversifier la consommation des produits ammoniacaux ou nitrés ; les premiers servent surtout à la fabrication de la soude par le procédé « à l'ammoniaque »; l'agriculture consomme des quantités notables de sulfate

d'ammoniaque, que les microbes du sol transforment progressivement en nitrates ; pour l'instant, la distillation de la houille satisfait amplement à ces diverses exigences, mais le prix commercial des sels ammoniacaux s'élève avec leur consommation. C'est surtout sur les nitrates que se porte l'appétit grandissant de notre agriculture et de notre industrie : l'Amérique du Sud, qui n'exportait pas 1.000 tonnes de ce produit en 1825, en a extrait 1.500.000 tonnes en 1900 et 2.400.000 tonnes en 1910. L'Europe, qui est le consommateur des nitrates américains, paie de ce chef au Chili un impôt annuel qui dépasse trois cent millions de francs ; encore est-elle fort heureuse de trouver un corps indispensable à son industrie, puisque l'acide azotique est à la base de tous nos explosifs, et à son agriculture, car c'est par l'emploi systématique des nitrates qu'on a pu réaliser la culture intensive des céréales : c'est donc avec le nitre qu'on fait la poudre et le pain qui sont, pour le civilisé comme pour l'homme à demi barbare, deux produits « de première nécessité ». Or, la fécondité des gisements chiliens n'est peut-être pas illimitée ; en 1888, le gouvernement chilien avait fixé à 1913 l'épuisement des dépôts connus à cette époque ; nous serions arrivés à l'échéance

si de nouvelles découvertes ne l'avaient reportée, d'abord à 1940, puis à l'année 2.047 ; ce qui résulte de ces statistiques incohérentes, c'est qu'un produit de première importance peut nous manquer d'un siècle à l'autre, et cela suffit pour causer un sentiment d'inquiétude.

Cette situation devait naturellement suggérer l'idée de capter dans l'atmosphère l'azote inutilisé, pour le faire entrer dans des combinaisons chimiques ; les matières premières, azote, oxygène, hydrogène, sont à pied d'œuvre, il ne s'agit que de les associer. L'ingénieux travail des bactéries est pour nous un encouragement plus qu'un exemple, car les procédés employés par la nature sont inimitables. Mais on pourrait, du moins, songer à systématiser le travail de ces petits ouvriers, qui ne font jamais grève, de façon à en tirer une opération industrielle ; l'industrie moderne ne se fait pas scrupule de demander au travail des microbes l'alcool ou l'acide acétique dont elle a besoin ; elle n'hésiterait pas davantage à y recourir pour réaliser les combinaisons de l'azote. Précisément, MM. Müntz et Lainé ont indiqué le moyen d'utiliser industriellement les agents nitrificateurs isolés par Winogradsky ; il suffit d'arroser avec des sels ammoniacaux un lit de tourbe mélangée à une

certaine proportion de calcaire ; les ferments nitreux et nitriques pullulent rapidement dans ce milieu bien aéré, et il se forme du nitrate de chaux qu'on extrait par des lessivages ; le calcul montre qu'en appliquant ce procédé à toutes les tourbières de France, on aurait de quoi compenser amplement l'apport du Chili, si les gisements américains venaient à s'épuiser.

Voilà donc un premier remède, mais il a l'inconvénient d'utiliser de l'azote déjà combiné. On peut faire mieux : la combinaison directe de l'azote et de l'oxygène peut s'effectuer sous l'action répétée des étincelles électriques, et en présence d'une solution de potasse ou de soude ; le fait n'est pas connu d'aujourd'hui, car il a été mis à profit, en 1784, par le chimiste anglais Cavendish dans ses travaux remarquables sur l'air atmosphérique. L'expérience de Cavendish fut reprise, en 1895, avec un soin tout spécial, par W. Ramsay et Lord Rayleigh, dans le travail célèbre qui aboutit à la découverte de l'argon et de ses compagnons ; comme des expérimentateurs aussi consciencieux ne font jamais rien à demi, ceux-ci avaient déterminé les meilleures conditions pour réaliser la combinaison de l'azote et de l'oxygène, et la dépense correspondante en énergie électrique.

Les choses en étaient là quand Sir William Crookes fit, en 1898, devant le meeting de l'Association britannique à Bristol, une conférence dont le retentissement fut immense. Il montra d'abord que notre atmosphère est un mélange combustible, puisque les deux éléments essentiels qui le constituent, azote et oxygène, peuvent entrer en combinaison avec dégagement de chaleur ; si cette atmosphère ne s'embrase pas d'une seule flambée chaque fois qu'un éclair jaillit dans le Ciel, cela tient à un hasard, d'ailleurs fort heureux : *La température d'inflammation du mélange est supérieure à sa température de combustion.* Expliquons ceci par un exemple : le mélange de grisou et d'air qui se forme dans certaines houillères ne peut s'enflammer que lorsque sa température est portée au moins à mille degrés ; si cette température est atteinte en un point, par exemple lors du choc d'un outil contre un morceau de silex, le grisou s'allume en ce point et la chaleur dégagée par sa combustion amène la température aux environs de deux mille degrés ; cette température est alors suffisante pour enflammer la masse grisouteuse placée dans son voisinage, qui met à son tour en réaction d'autres parties du mélange, si bien

que la combustion se propage très rapidement dans toute la masse.

Au contraire, allumons une allumette ; dans l'air atmosphérique, il ne se produit rien, si ce n'est que l'allumette brûle ; la température de l'allumette, — quinze à dix-huit cents degrés, — est, en effet, inférieure à la température d'inflammation, trois mille degrés environ, du mélange d'azote et d'air ; si on fait éclater un arc électrique, où la température dépasse quatre mille degrés, la combinaison des éléments de l'air se produira, mais elle ne pourra pas se propager parce qu'elle ne développe dans la masse gazeuse qu'une température de sept ou huit cents degrés, incapable par conséquent d'allumer les régions avoisinantes.

Tout ceci n'est qu'un jeu de savant, car personne n'a jamais mis en doute l'incombustibilité pratique de l'atmosphère. Mais Crookes continuait son étude en montrant que les expériences de Lord Rayleigh et de Ramsay permettaient d'estimer le prix de revient d'une production électrique des nitrates ; en tenant compte des prix pratiqués aux chutes du Niagara pour l'énergie électrique, il arrivait à conclure qu'une tonne de nitrate de soude, produite électriquement, reviendrait à 125 francs, tandis que ce prix

n'est pas loin de 200 francs pour une tonne de nitrate chilien, transportée en Europe.

Grâce à la conférence de Crookes, dont la forme originale, ou, comme on dit aujourd'hui, sensationnelle, était bien faite pour frapper les imaginations, l'utilisation de l'azote atmosphérique se plaçait au premier plan dans les préoccupations des électrochimistes. Mais le problème était seulement posé ; il fallut une dizaine d'années pour en dégager les éléments et pour aboutir à un commencement de réalisation pratique. L'idée dominante qui sortait de toutes ces recherches était qu'il fallait porter le mélange d'oxygène et d'azote à une température aussi élevée que possible, et le refroidir ensuite très rapidement au-dessous de 1.200 degrés, afin d'éviter une décomposition qui se produit pendant la période de refroidissement et qui ramènerait, si on n'y prenait garde, le rendement au voisinage de zéro. Ce résultat est obtenu par l'emploi d'arcs électriques largement étalés : ainsi MM. Guye et Naville utilisent un dispositif analogue au parafoudre « à cornes » qui sert à préserver les canalisations aériennes à haute tension contre les chutes d'électricité atmosphérique ; l'arc éclate entre deux tiges métalliques divergentes en un point où la distance de ces tiges n'est que de quelques

centimètres, puis il s'élève en s'élargissant entre les deux cornes de métal, jusqu'au moment où il se brise spontanément; lorsqu'on emploie, comme source d'électricité, du courant alternatif, chaque demi-période du courant donne un arc; tous les arcs qui se succèdent à raison de cinquante ou plus par seconde, forment entre les deux branches métalliques une véritable nappe de feu, déployée en forme d'éventail et dont la longueur totale dépasse cinq mètres; l'air s'élève en léchant cette large surface, puis il est entraîné par des cheminées d'appel et circule dans des tours où il rencontre des solutions alcalines qui l'absorbent.

Parmi tous les procédés essayés jusqu'ici, le plus pratique est dû au physicien norvégien Birkeland, l'esprit audacieux auquel nous devons de si remarquables études sur les orages magnétiques et les aurores boréales. Le four électrique de Birkeland comprend de puissants électro-aimants qui étalent l'arc sous forme d'un disque de trois mètres de diamètre; neuf de ces fours, dont chacun dépense une puissance de quatre mille chevaux, sont actuellement en marche à l'usine de Notodden, qui utilise la grande chute de Svœlgfos, et la production annuelle de nitrate de chaux s'élève à 25.000 tonnes; on voit par

ces chiffres qu'il ne s'agit plus d'une simple expérience de laboratoire et que la mine d'azote qui s'étend au-dessus de nos têtes commence à être sérieusement exploitée. D'autres usines, exploitant des procédés différents, sont en activité dans le Tyrol et en France[1]. Mais ceci n'est qu'un début ; à en croire les ingénieurs, des puissances colossales vont être aménagées pour « brûler l'air » dans des fours électriques. C'est la Norvège qui prend la tête de ce mouvement industriel et on ne parle pas d'aménager moins d'un demi-million de chevaux dans les pays scandinaves, ce qui permettrait de fabriquer annuellement trois cent mille tonnes de nitrates, c'est-à-dire le septième de l'exportation chilienne ; c'est qu'à l'user, la Scandinavie s'est trouvée le pays où les puissances hydro-électriques reviennent au plus bas prix : les chutes naturelles y abondent, remarquables par la grandeur et la constance de leur débit ; enfin, elles sont, en général, placées au voisinage de la mer, à quelques kilomètres seulement des fjords bien abrités où les navires viennent charger les marchandises.

1. A la Roche de Rame, près de Briançon, où neuf fours sont en activité, avec une puissance totale de sept mille chevaux.

C'est grâce à ces conditions exceptionnelles que la nouvelle industrie peut prospérer, car la synthèse des nitrates est, il faut bien le dire, une opération très mal conduite au point de vue économique et qui s'accompagne d'un véritable gaspillage d'énergie ; en faisant le décompte de l'opération, on constate que le rendement atteint tout juste 4 p. 100, c'est-à-dire qu'on produit quatre tonnes de nitrate avec une dépense d'énergie qui devrait en donner cent, si cette énergie était bien employée. Il n'y a pas beaucoup d'industries qui fonctionnent dans des conditions aussi déplorables ; pour que celle-là progresse, il faut qu'elle ait devant elle un riche avenir. On parviendra certainement à réaliser des rendements moins dérisoires ; M. Claude signalait récemment l'intérêt qu'aurait la nouvelle industrie à utiliser, à la place de l'atmosphère « brute » de l'air suroxygéné qu'on obtient aujourd'hui par les voies économiques de la réfrigération ; il est certain qu'un rendement de 8 à 10 p. 100, dont la réalisation n'est pas chimérique, ferait tomber rapidement au voisinage de zéro l'exploitation des gisements du Chili.

*
* *

Il est rare qu'un problème industriel ne puisse

être abordé que d'un seul côté ; la manière forte et directe, pratiquée par M. Birkeland, n'est pas nécessairement la meilleure ; en tout cas, on en pratique une autre, dont l'importance et les applications se développent rapidement. On avait déjà remarqué, dès les débuts de la fabrication industrielle du carbure de calcium, que ce produit est capable d'absorber, à chaud, une certaine quantité d'azote atmosphérique ; les savantes études de MM. Franck et Caro établirent qu'il s'agissait d'une véritable réaction chimique, qui transforme le carbure en un produit nouveau, la *cyanamide calcique*. Chose curieuse, cette réaction ne se produit pas avec le carbure chimiquement pur, tandis qu'il suffit de chauffer le produit industriel au voisinage de mille degrés pour observer une absorption très énergique d'azote, accompagnée d'un dégagement de chaleur qui peut échauffer la masse de plusieurs centaines de degrés ; ceci fournit un exemple topique de l'activité de certains agents « catalyseurs » qui déterminent les réactions chimiques par leur présence et sans y intervenir, au moins en apparence ; la science moderne est pleine des applications de cette propriété et nous en verrons tout à l'heure un nouvel exemple. Voici donc une nouvelle manière de faire entrer

l'azote en combinaison; mais que vaut cette combinaison? On peut tout résumer d'un mot en disant que la cyanamide est du « guano minéral » ; sa composition chimique est analogue à celle des éléments actifs du guano, et ceci explique l'efficacité de son emploi en agriculture ; introduite dans le sol, elle se décompose au contact de l'humidité en donnant, avec un résidu de craie, de l'ammoniaque qui se dissout dans cette eau intérieure du sol ou qui se combine aux produits acides contenus dans l'humus. L'emploi de la cyanamide en agriculture revient donc à celui des sels ammoniacaux dont les recherches des agronomes ont établi l'efficacité ; nous avons dit tout à l'heure qu'en présence des ferments contenus dans le sol et de l'oxygène atmosphérique, ces sels étaient transformés peu à peu en nitrates, et c'est probablement sous cette forme qu'ils sont, en fin de compte, utilisés par les végétaux.

Voici, dès lors, comment on procède pour préparer la précieuse cyanamide : le carbure de calcium, préalablement broyé, est introduit, par charges de cinq cents à mille kilos, dans des tambours en terre réfractaire, traversés suivant leur axe par un cylindre de charbon ; ce charbon sert uniquement à échauffer la masse et à amor-

cer la réaction chimique ; on y envoie un courant électrique qui le porte au rouge vif; le carbure s'échauffe au contact, et lorsque la température est suffisante, ce qui arrive au bout de trois ou quatre heures, on envoie dans les fours un courant d'azote ; la réaction commence aussitôt et, à la faveur de la chaleur qu'elle dégage, toute la masse de carbure s'échauffe de proche en proche et absorbe le gaz jusqu'à saturation ; l'opération est terminée au bout d'une trentaine d'heures ; il ne reste plus qu'à décharger les fours, où la cyanamide forme une masse compacte. Cette masse renferme, avec la chaux en excès du carbure primitif, un peu de carbure qui a échappé à l'action de l'azote ; ces impuretés, si on les laissait subsister, nuiraient au transport et à la conservation du produit ; il est avantageux de traiter la cyanamide brute par l'eau qui décompose ou neutralise ces impuretés. On procède ensuite au broyage, et on obtient ainsi le produit commercial, la « cyanamide décarburée » qui renferme 15 p. 100 de son poids d'azote combiné.

Tout cela est fort bien, mais de ce qu'une opération est praticable, il ne suit pas qu'elle soit profitable, et la balance des comptes est une terrible épreuve pour les inventions. Les fabri-

cants de la cyanamide n'ont pas tardé à s'apercevoir que leur budget était grevé d'une dépense très élevée et parfaitement inutile ; c'est celle qui correspond à l'usure des cylindres de charbon. On opérait primitivement sur de l'azote passablement impur, obtenu par des procédés chimiques, et l'oxygène corrodait rapidement les électrodes. On s'est donc trouvé amené à employer de l'azote de plus en plus pur, à tel point que la tolérance en oxygène ne dépasse plus aujourd'hui deux ou trois millièmes. Le problème qui se trouve posé par cette exigence n'est pas résoluble par les méthodes chimiques ; mais la liquéfaction de l'air a permis de lui apporter une solution aussi élégante qu'économique. La production de l'air liquide n'est pas, par elle-même, une opération profitable, mais elle permet de distiller l'air liquéfié, et de séparer les divers gaz qui le constituent, entre autres l'oxygène et l'azote. Or l'oxygène était jusqu'ici le seul produit de cette opération qui eût une valeur marchande et l'azote n'était qu'un résidu, qu'on rejetait dédaigneusement à l'atmosphère ; il n'en va plus de même aujourd'hui et M. Georges Claude a obtenu dans cette voie, des résultats plus qu'encourageants. Ainsi, les grandes fabriques de cyanamide de Terni, en Italie, viennent

d'installer deux générateurs d'azote, fonctionnant par liquéfaction de l'air, qui produisent par heure 800 mètres cubes d'azote à 99,7 p. 100 ; des appareils identiques, mais plus puissants, sont en montage dans deux usines suédoises. Ces méthodes purement physiques de préparation de l'azote, qui ne dépensent que de l'énergie, sont tout à fait à leur place dans les usines électrochimiques, qui disposent en général d'une énergie surabondante ; aussi tout porte à croire que cet essai de symbiose du four électrique et de l'usine à l'air liquide aura les meilleures conquences économiques.

Pour le moment, l'industrie de la cyanamide est en plein épanouissement ; la production annuelle est voisine de soixante mille tonnes, ce qui correspond, pour les applications agricoles, à un poids égal de sulfate d'ammoniaque. Au point de vue du rendement en azote, ce procédé indirect paraît supérieur à la formation directe des nitrates, car il permet de fixer 400 kilos d'azote atmosphérique en dépensant, pendant un an, la puissance d'un cheval, tandis que le procédé Birkeland donne quatre fois moins d'azote combiné pour une même consommation d'énergie. Enfin, une autre considération a contribué à l'essor de la cyanamide : le propre de l'industrie

du carbure de calcium, depuis qu'elle existe, est d'être congestionnée ; les usines à carbure ont poussé, comme des champignons, sur tous les points du monde, mais leur puissance de production a toujours été supérieure à leurs débouchés ; l'éclairage par l'acétylène reste étouffé entre ses deux puissants rivaux, le gaz et l'électricité, et ne trouve l'occasion d'un développement assez lent que dans des applications d'importance secondaire. On conçoit dès lors que ces usines aient saisi avec allégresse l'occasion d'utiliser leur carbure en produisant un corps dont les applications, à l'agriculture seule, sont presque illimitées, puisque la consommation du sulfate d'ammoniaque comme engrais approche d'un million de tonnes et que la cyanamide est prête à le remplacer, dans le même office, kilogramme pour kilogramme.

Voilà donc une industrie qui table sur des réalités solides : il y a des usines à cyanamide jusqu'aux Indes et au Japon. Mais elle a aussi des espoirs illimités ; en plus de ses applications directes à l'agriculture, la cyanamide peut devenir la source principale de l'ammoniaque et des sels ammoniacaux utilisés par l'industrie : il suffit de la chauffer en présence de la vapeur d'eau sous une pression de huit atmosphères pour en

tirer de l'ammoniaque, plus pure que celle qui provient de la distillation de la houille. On peut aller plus loin encore et, imitant le travail souterrain des bacilles, transformer cette ammoniaque en azotates. Lorsqu'on essaya, pour la première fois, de combiner directement l'ammoniaque et l'oxygène, on eut le plaisir de réaliser une combustion assez vive... Mais il ne se formait que de l'eau et de l'azote, sans la moindre trace de nitrate, si bien qu'on avait tout simplement restitué à l'atmosphère le corps qu'on en avait séparé à grand'peine. Le succès était médiocre, mais les chimistes se souvinrent à temps d'une jolie expérience qui date, peut-être, des temps lointains de l'alchimie : de l'air qui vient de barboter dans une solution d'ammoniaque arrive au contact d'une spirale formée d'un fil de platine ; il suffit de porter une fois le platine au rouge à l'aide d'une allumette ; il reste rouge indéfiniment, ou du moins tant qu'il est en contact avec le mélange d'ammoniaque et d'air ; on réalise ainsi une sorte de lampe à incandescence, qui répand autour d'elle une très médiocre clarté ; est-ce pour cela qu'on l'appelle *lampe philosophique* ? Ce qui nous intéresse, ce n'est pas tant la lumière qu'elle fournit que les réactions chimiques qu'elle détermine ; elle réa-

lise en effet une suroxydation de l'azote, qui sort de l'opération transformé partiellement en acide azotique. Quel est le rôle du platine dans cette réaction ? Personne n'en sait rien, car ce n'est pas répondre que de déclarer qu'il agit comme « catalyseur » ; le fait est que ce métal reste inaltéré, et que son action est spécifique et tellement précise, que le platine en mousse spongieuse ne donne pas du tout le même résultat que le métal aggloméré.

Or, cette jolie expérience de la lampe philosophique, que le professeur montrait jadis à ses élèves comme un amusement sans conséquence, est en passe de devenir aujourd'hui une grosse opération industrielle ; elle a été mise au point par le célèbre chimiste allemand Ostwald, et elle est appliquée dès à présent dans une usine située en Westphalie, près de Bochum : le mélange d'ammoniaque et d'air circule dans des réchauffeurs qui l'amènent, à la température voulue, au contact d'une série de feuilles de platine disposées en nids d'abeille comme dans les radiateurs placés à l'avant des automobiles ; on règle la vitesse d'écoulement de telle sorte que le mélange gazeux ne reste pas plus d'un centième de seconde au contact du platine, sans quoi le génie contrariant du catalyseur déferait la com-

binaison qu'il a commencé par édifier ; le gaz refroidi passe dans des tours où, au contact de l'eau et de l'air en excès, la formation de l'acide azotique s'achève. L'usine livre ainsi, journellement, cinq tonnes d'acide azotique commercial.

Nous venons de passer une rapide revue des acquisitions que la chimie a faites, en trente ans, sur la question de l'azote. On voit combien ce laps de temps, qui représente l'effort d'une génération humaine, a modifié notre point de vue. Au point de départ, l'azote vital et l'azote atmosphérique forment presque deux corps différents, l'un mélangé incessamment à la vie, l'autre, confiné dans son splendide et céleste isolement. Tout d'un coup, on apprend que les infiniment petits savent la manière de faire passer l'azote de son cycle vital au cycle atmosphérique ou inversement ; enfin c'est la chimie elle-même, et non pas la délicate chimie organique, mais la chimie minérale la plus brutale, avec ses fours électriques et sa brûlante cuisine, qui trouve le moyen de saisir à son tour l'azote atmosphérique et de l'introduire de force dans ses multiples combinaisons. Et, maintenant, l'unité de ce corps nous apparaît nettement ; tout l'azote qui existe dans l'écorce superficielle du

globe vient de l'atmosphère, et y retourne tôt ou tard; notre industrie moderne, en découvrant et en appliquant des activités de l'azote jadis insoupçonnées, ne fait que hâter, et sans doute de bien peu, ce perpétuel échange qui est comme la respiration en azote de la terre et de tout le monde vivant.



LA CATALYSE

LA CATALYSE

C'est une habitude, dans les réunions savantes, d'inviter les étrangers de marque à exposer leurs idées ou leurs découvertes ; on trouve en effet dans ces causeries ce qui manque aux mémoires imprimés : l'atmosphère du laboratoire et la pensée intime du savant. C'est en vertu de cet usage que la Société chimique allemande a prié M. Paul Sabatier, doyen de la Faculté des Sciences de Toulouse, de venir exposer à Berlin la méthode de synthèse chimique dont il est le créateur. Une telle invitation adressée par un pays étranger et surtout par l'Allemagne, où la chimie est si florissante, est un honneur très apprécié. D'ailleurs M. Sabatier est un des maîtres de la chimie contemporaine ; l'attribution d'un prix Nobel a consacré ses travaux, et il a formé des élèves qui sont devenus des maîtres à leur tour. Avec leur collaboration, il a montré sous un nouveau jour la puissance des forces cata-

lytiques. La catalyse ! Voilà un mot bien savant et qui donne tout de suite une haute idée de ceux qui l'emploient ; il ne sert en réalité qu'à masquer notre ignorance et à désigner la cause inconnue d'une classe de phénomènes : on dit action catalytique comme on dirait action de présence. D'ordinaire, quand on produit une réaction chimique, tous les corps en contact en subissent les effets ; c'est une bataille, et tous les combattants y portent la marque des coups. Au contraire, l'agent catalyseur est comme le général qui, impassible, à l'abri des balles, commande la bataille et en détermine les résultats ; il est nécessaire à la réaction, et pourtant, il n'est pas, en apparence, modifié par elle. Plus la chimie avance, plus le rôle de ces agents s'affirme important : tout le monde a entendu parler des réactions provoquées par les corps poreux, noir de platine, amiante platinée, et de leur application à la synthèse industrielle de l'acide sulfurique ; de même les innombrables réactions chimiques provoquées par les diastases et par les métaux colloïdaux relèvent de la catalyse ; c'est d'ailleurs une classification toute provisoire, puisque nous ne savons pas comment agissent les catalyseurs.

L'idée directrice de M. Sabatier et de son col-

laborateur M. Senderens a été d'employer, comme agents catalyseurs, des poudres métalliques obtenues en réduisant les oxydes par l'hydrogène ; il est nécessaire que cette réduction soit effectuée à basse température, sans quoi les particules de métal s'agglomèrent par la chaleur en grains plus gros et le corps devient inactif ; en effet, ce qui caractérise la fonction catalytique, c'est qu'elle dépend de la surface de l'agent et non de sa masse ; or cette surface devient énorme dans les corps très divisés : si on assigne aux particules du métal réduit, supposées sphériques, un diamètre d'un millième de millimètre (ce qui est probablement au-dessus de la réalité), un centimètre cube de substance donnera deux mille milliards de grains dont la surface totale, égale à six mètres carrés, sera dix mille fois plus grande que la surface du cube ; la poussière sera donc dix mille fois plus active que le même corps pris en masse.

Ce qui prouve bien que l'action catalytique tient plus à l'étendue de la surface qu'à la nature chimique de l'agent, c'est que les divers métaux essayés : platine, nickel, cobalt, fer, cuivre se sont tous montrés efficaces ; ils le sont, il est vrai, à des degrés différents, ce qui peut tenir à la finesse plus ou moins grande des

particules ; le nickel est le plus actif, et c'est lui que M. Sabatier et ses collaborateurs emploient de préférence. Il suffit de faire passer les corps qu'on veut faire réagir, à l'état de gaz ou de vapeur, dans un tube où l'on a déposé, sur quelques centimètres de longueur, la poudre métallique portée à une température variable suivant les cas, mais comprise d'ordinaire entre cent cinquante et trois cents degrés ; la réaction se produit aussitôt, et les produits en peuvent être recueillis à l'extrémité du tube ; le métal se retrouve tout entier à la fin de l'opération, et il peut servir pendant plus d'un mois à de nouvelles opérations.

Un mois, c'est long, mais ce n'est pas l'éternité ; ainsi la poudre métallique s'altère petit à petit, sans perdre de son poids, et devient impropre à jouer son rôle catalyseur. La cause de cette usure est assez curieuse : il s'agit d'un véritable empoisonnement.

Certains corps, comme le soufre, le chlore, le brome et l'iode, agissent à dose infinitésimale sur les métaux pulvérulents, et des traces de ces corps suffisent à en gêner, puis à en interrompre l'activité. C'est pour cela que les métaux en question doivent être préparés avec des produits rigoureusement purs ; sans quoi, souillés

dès l'origine, ils sont incapables d'agir ; mais il faut aussi que les vapeurs et les gaz soumis à l'action catalysante ne renferment pas ces poisons du métal, sous peine de les tuer après un court fonctionnement.

L'hydrogène surtout est à surveiller de très près ; celui qu'on obtient par l'action du zinc sur les acides transporte des impuretés dont on n'arrive jamais à le débarrasser complètement ; aussi M. Sabatier recommande-t-il l'emploi de l'hydrogène électrolytique, obtenu en décomposant par le courant électrique de l'eau additionnée de potasse ; mais si pur qu'il soit alors, il ne l'est jamais rigoureusement ; le poison qu'il transporte à dose impondérable s'accumule dans le métal et finit par supprimer sa vitalité ; c'est pour cela que le catalyseur a besoin d'être régénéré de temps en temps.

Cet empoisonnement des agents catalyseurs est un phénomène connu de longue date ; les métaux colloïdaux peuvent être paralysés par des doses extraordinairement faibles de certains corps, hydrogène sulfuré, sulfure de carbone, acide cyanhydrique, tout comme les diastases de la matière organisée. C'est une des raisons qui font dire à M. Sabatier que les métaux catalyseurs sont analogues à des ferments. Un fer-

ment, c'est un corps dont une dose minime peut transformer des quantités illimitées, ou du moins très grandes de substance : avec un gramme de présure on peut faire cailler cent litres de lait et la présure se retrouve, à la fin, inaltérée. De même, sur un gramme de nickel en poudre, on pourra faire passer sans arrêt, pendant des semaines, un mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone et produire la réaction de ces deux corps ; le nickel, à la fin, se retrouvera tout entier ; il aura seulement subi un amoindrissement de ses facultés catalysantes.

Nous connaissons le principe de la méthode nouvelle ; il faut maintenant juger l'arbre à ses fruits ; or ceux-ci sont innombrables. L'action des métaux pulvérulents constitue un moyen puissant d'hydrogénation, applicable, presque sans exception, à tous les corps gazeux ou vaporisables. Mais les résultats peuvent être très différents suivant les cas. Le plus simple qui puisse se présenter est l'union directe et complète ; ainsi le nickel provoque, à la température ordinaire, la combinaison de l'acétylène et de l'hydrogène avec formation d'un autre carbure gazeux, qui est l'éthane ; la transformation est totale, c'est-à-dire sans déchet ni résidu, et cet exemple nous montre en passant un des

grands avantages de la méthode nouvelle, qui est l'excellence de ses rendements ; au contraire, beaucoup de procédés de synthèse, admirables quand on les formule sur le papier, donnent dans la pratique des résultats misérables à cause des réactions parasites qui les accompagnent. Mais l'hydrogénation de l'acétylène ne garde cette simplicité qu'autant que le nickel est maintenu froid. Si l'on élève la température au-dessus de deux cents degrés, il se produit, en même temps que l'éthane, un certain nombre de carbures liquides que leur fluorescence, leur densité, leur odeur, leur composition chimique rapprochent des pétroles américains ; en diminuant la proportion d'hydrogène admis avec l'acétylène, on peut obtenir à volonté soit les pétroles roumains, soit ceux de Bakou. Simple jeu de chimiste, dira-t-on. Évidemment, il ne s'agit pas de fabriquer du pétrole par le nickel en poudre ; l'opération serait peu rémunératrice ; mais la science ferait un grand pas si elle parvenait à expliquer comment les pétroles ont pu se former. Il n'y a pas de problème plus intéressant, ni dont la solution soit plus lointaine ; l'expérience de MM. Sabatier et Senderens fournira peut-être la clef d'une explication rationnelle ; il serait téméraire, pour l'instant,

de lui demander davantage : la nature dispose de tant de moyens d'action, elle a fait tant de réactions et réalisé tant de combinaisons au cours des siècles, que c'est un grand hasard si nous tombons juste sur les méthodes qu'elle a suivies.

Le cas de l'hydrogénation pure et simple, dont la transformation de l'acétylène en éthane nous a donné un exemple, se produit fréquemment ; mais il n'est pas le seul. Il arrive très souvent que le corps mélangé à l'hydrogène est fortement disloqué, surtout quand il renferme de l'oxygène, qui s'élimine sous forme d'eau avec une partie de l'hydrogène. Si on fait passer sur du nickel en poudre chauffé à deux cents degrés un mélange d'oxyde de carbone et d'hydrogène, il se forme de l'eau et du méthane, d'après la réaction

$$CO + 6\ H = H^2O + CH^4$$

Une réaction toute semblable, toujours accompagnée d'une formation d'eau et de méthane, se produit quand on remplace l'oxyde de carbone par le gaz carbonique, mais il faut alors chauffer le nickel au-dessus de trois cents degrés. Or le méthane est identique au grisou des mineurs et il forme un des éléments essentiels du gaz d'é-

clairage ; c'est donc un gaz éminemment combustible et éclairant ; aussi sa synthèse présente-t-elle un intérêt économique de premier ordre ; la matière première, mélange d'oxygène et d'hydrogène, est le gaz à l'eau, qu'on obtient à très bas prix par l'action de la vapeur d'eau sur le charbon incandescent ; il suffira d'un peu de nickel, qui reste inaltéré, ou qui peut être aisément régénéré, pour en faire du méthane. On s'explique donc que les applications industrielles du « gaz méthane » aient tenté les hommes d'affaires ; mais le problème industriel s'est trouvé associé à des combinaisons financières qui ont fait beaucoup de bruit, et auxquelles, bien entendu, les créateurs de la méthode sont restés complètement étrangers.

On voit donc que l'œuvre scientifique de M. Sabatier ouvre aux chimistes un large champ d'action. Je n'ai dit de ces travaux que ce qui pouvait en faire comprendre le principe et en montrer l'importance; mais il n'est pas inutile d'ajouter que l'hydrogénation par catalyse est entrée dans la pratique des laboratoires français et étrangers, et qu'elle a donné en peu de temps un grand nombre de résultats nouveaux. Sous la direction de M. Senderens, l'habile collaborateur de M. Sabatier, une grande maison française a

installé, à Toulouse, une fabrique de produits chimiques obtenus par catalyse, et ces produits expédiés dans toute l'Europe, apportent la preuve que la science chimique française, un instant subalternisée par l'Allemagne, a reconquis la maîtrise qu'elle avait su conquérir au temps de Lavoisier, de Dumas et de Gay-Lussac.



LES EXPLOSIFS

LES EXPLOSIFS

L'étude des explosifs soumet la science à une dure épreuve : la poudre qui se décompose dans l'âme d'un canon, ou dans l'enceinte close d'un obus ou d'un trou de mine, développe en quelques millièmes de seconde des températures qui dépassent souvent deux mille degrés, des pressions de plusieurs milliers d'atmosphères, des vitesses voisines du kilomètre par seconde ; la chimie, la physique et la mécanique sont d'abord un peu décontenancées en face d'effets aussi brusques et aussi intenses ; pourtant, elles ne restent pas désarmées et c'est une chose remarquable qu'on ait pu étudier d'une façon minutieuse et précise des phénomènes qui paraissent placés au delà du cadre ordinaire des recherches scientifiques ; la pyrotechnie et la balistique sont de véritables sciences, ou plutôt des applications très précises des sciences fondamentales ; les ingénieurs et les officiers qui les font progresser

rendent autant de services à la chimie et à la physique, dont ils prolongent le domaine, qu'à la patrie dont ils sauvegardent l'indépendance.

L'explosion, en effet, n'est pas un phénomène à part, une rage fortuite et sans lois ; c'est une réaction chimique semblable à beaucoup d'autres, mais qui porte à un plus haut degré certaines propriétés : la rapidité, la chaleur dégagée et l'émission des produits gazeux. Entre l'attaque du zinc ou du fer par l'acide sulfurique et l'explosion de la nitroglycérine, il n'y a qu'une différence de degré, mais cette différence est assez grande pour faire croire à l'apparition de propriétés nouvelles et essentielles. Ainsi, on parle couramment de la « puissance formidable » des explosifs, et il ne viendrait à l'idée de personne qu'un kilogramme de pétrole puisse produire, en brûlant, autant et plus d'énergie qu'un poids égal de dynamite ; de temps en temps, il se trouve des inventeurs pour imaginer de faire marcher des moteurs d'aéroplanes avec des explosifs, dans l'espoir d'engendrer, avec un faible poids, une grande puissance mécanique ; or, ils se trompent lourdement, et même s'ils réussissaient à faire marcher leur machine, ils n'arriveraient qu'à établir ce que tous les chimistes savent déjà, à savoir qu'il y a plus d'énergie utilisable, à poids

égal, dans l'essence de pétrole que dans n'importe quel explosif; seulement, l'énergie de l'essence est développée en plusieurs minutes, tandis que l'explosion opère par choc, et libère en moins d'un centième de seconde toute la puissance mécanique contenue dans la substance détonante; de même, le marteau soulevé par la main d'un enfant peut produire, à l'instant où il s'abat, des effets qu'on ne produirait pas avec une machine de cent chevaux.

Ainsi, la brièveté est le facteur prépondérant dans les effets d'une explosion. Si la durée avoisine le millième de seconde, la vitesse et la pression communiquées aux gaz dégagés sont telles qu'aucune paroi, si robuste soit-elle, n'est capable d'y résister; l'acier le plus dur est entaillé par le choc du gaz comme par un burin; il peut être, suivant les cas, déchiqueté, brisé en fragments ou même réduit en poussière; la poudre est alors *brisante* et les objets en contact avec elle sont détruits, en quelque sorte par surprise, sans avoir eu le temps de se mettre en état de défense en éprouvant les déformations élastiques qui leur permettent de s'arcbouter et de résister aux efforts. Si au contraire, la durée d'explosion s'allonge jusqu'aux environs du centième de seconde, la poudre est *propulsive,* c'est-

à-dire qu'elle peut être employée, dans une arme à feu, pour lancer un projectile ; le canon soumis à une compression graduelle, peut alors résister aux pressions intérieures ; les frettes qui le compriment extérieurement l'aident à se défendre ; il n'éclate pas et toute l'énergie libérée par l'explosion, à part celle qui produit le recul de l'arme, est transmise au projectile ; dans ces conditions, l'arme à feu ressemble à nos moteurs à explosion ; la seule différence réside dans la rapidité des phénomènes mais, pour le reste, l'analogie est si parfaite, que le rendement mécanique du canon est très voisin du rendement des bons moteurs à essence : dans un cas comme dans l'autre, un quart environ de la chaleur dégagée est transformé en travail mécanique.

*
* *

L'importance prépondérante du temps dans les effets de l'explosion montre l'intérêt que les balisticiens ont à régler ce temps à une durée convenable. La chose serait aisée, comme on va le voir tout à l'heure, si une circonstance, à certains égards malheureuse, ne venait compliquer les phénomènes ; en effet, les poudres ont, en général, deux régimes d'explosion, la *combus-*

tion et la *détonation*, et elles peuvent parfois passer de l'un à l'autre avec une brusquerie déconcertante. Prenons, par exemple, une cartouche de dynamite ; enflammée à l'air libre, avec une allumette, elle brûle comme un feu de Bengale, c'est-à-dire le plus tranquillement du monde ; mais il n'en est plus de même si la décomposition est provoquée par le choc d'un marteau ou, ce qui est infiniment plus commode, par la détonation d'une capsule de fulminate ; l'explosion qui se produit alors est si soudaine et si brutale qu'elle détruit tout dans un rayon de plusieurs mètres autour d'elle, et pourtant l'énergie libérée n'est pas plus grande que dans la combustion paisible ; les maraudeurs qui dépeuplent rivières et étangs en pêchant à la dynamite, fournissent une belle démonstration de ces propriétés brisantes de la détonation ; au bout de quelques instants, tous les poissons qui se trouvaient dans un rayon étendu viennent flotter, inertes, à la surface de l'eau ; le choc transmis par le liquide a littéralement broyé tous leurs tissus ; bien qu'ils ne présentent aucune lésion apparente, ils sont morts dans toutes leurs cellules, et c'est pour cela que le poisson tué par ce procédé brutal et dévastateur ne se conserve frais que fort peu de temps.

Comment peut-on expliquer ces effets si dissemblables de décomposition ? La nitroglycérine, qui est le principe actif de la dynamite, se décompose dès que sa température atteint soixante-dix degrés ; si on a recours à une allumette pour produire cette température en un point de sa masse, la chaleur se propage de proche en proche, à partir du point chauffé et, comme la dynamite conduit mal la chaleur, elle se propage avec lenteur ; ainsi la décomposition n'atteint que peu à peu les couches successives de l'explosif, et les gaz libérés ont tout le temps de s'écouler dans l'atmosphère.

Si, au contraire, on emploie une amorce de fulminate, celle-ci opère par percussion, c'est-à-dire qu'elle donne un choc, d'une brusquerie inouïe, à la dynamite placée en face d'elle ; il en résulte une compression qui élève la température jusqu'au point de décomposition de la nitroglycérine ; mais les gaz dégagés par la tranche explosée agissent eux-mêmes comme un marteau sur la tranche suivante qui se comprime et se décompose à son tour ; il résulte de là une *onde explosive* qui se propage à travers la substance avec une rapidité extraordinaire, supérieure à la vitesse du son dans le même milieu : on a pu mesurer cette vitesse en bourrant d'explosif un

long tube d'étain traversé, de place en place, par des fils que parcourt un courant électrique; le passage de l'explosion provoque, avec la rupture des fils, des interruptions de courant qui s'inscrivent automatiquement sur un cylindre tournant; on a pu ainsi établir que l'onde explosive se propage, dans la dynamite, à raison de 2.700 mètres par seconde; la vitesse atteint 7.000 mètres dans le coton-poudre et 7.700 mètres dans la nitromannite; et ce qui prouve bien que la décomposition résulte d'un choc mécanique transmis dans la masse de l'explosif, c'est le phénomène bien connu de détonation « par influence » : on aligne des cartouches de dynamite, en laissant entre elles un intervalle de quinze à vingt centimètres; si on fait exploser la première, les autres détonent à leur tour et de proche en proche, par suite du choc transmis à travers l'air qui sépare les cartouches.

Avec une décomposition aussi brusque, on ne peut obtenir que des effets brisants; les explosifs qui détonent ne peuvent être utilisés dans les armes à feu, car ils seraient moins nuisibles à l'ennemi qu'à ceux qui les emploieraient. On conçoit d'après cela que ces corps se classent selon la facilité avec laquelle ils peuvent prendre l'un ou l'autre des deux régimes de décomposi-

tion; il en est, comme l'iodure d'azote, qui détonent infailliblement; le contact d'une barbe de plume suffit à démolir, avec grand fracas, l'édifice instable de leurs molécules; le fulminate de mercure est, pratiquement, dans le même cas, avec une susceptibilité moins ombrageuse, et c'est ce qui en explique l'emploi pour la fabrication des amorces.

A l'autre bout de la liste se trouvent des corps, comme l'ancienne poudre noire et les modernes poudres « colloïdales » qu'on n'a jamais pu faire détoner, même sous l'action des percussions les plus énergiques, comme le choc d'une balle de fusil; évidemment, ces essais ne prouvent pas, mathématiquement, que la détonation soit impossible dans tous les cas ; on s'est demandé, à propos des catastrophes successives de l'*Iéna* et de la *Liberté*, si un concours lamentable de circonstances, non encore réalisées dans les essais, n'avait pas pu provoquer l'apparition de ce régime destructeur; tout ce qu'on peut dire à ce sujet, c'est qu'une telle hypothèse n'est ni vraisemblable, ni nécessaire pour expliquer les effets dont notre marine a si cruellement souffert.

Entre les types extrêmes qui ne pratiquent qu'un seul mode de décomposition se placent les

explosifs « à double visage » qui peuvent, suivant les circonstances, passer de la combustion (qu'on appelle aussi déflagration) à la détonation ; et il faut souvent bien peu de chose pour provoquer ce changement. Prenons, par exemple, un fragment de fulmicoton comprimé ; placé à l'air libre, sur une table, il brûle avec sagesse et sans provoquer d'accidents ; mais il suffit qu'un obstacle très léger, une simple feuille de papier, s'oppose à l'écoulement régulier des gaz pour que leur accumulation comprime le fulmicoton et y fasse passer le frisson de l'onde explosive qui le décompose instantanément en broyant la table sur laquelle il repose.

Il est clair que le choix des poudres propulsives employées en artillerie ne peut porter que sur les explosifs qui déflagrent sans détoner. Mais, lorsqu'on a choisi une de ces poudres, il y a cent manières différentes de la faire brûler ; évidemment, le meilleur mode de combustion est celui qui produira les plus grands effets balistiques sans fatiguer l'arme par des pressions intérieures trop brusques ou trop élevées. Or, il existe une règle capitale qui domine la balistique : il faut que la poudre brûle pendant le temps que le projectile met à parcourir l'âme du canon ou du fusil ; c'est ce qu'on appelle *la loi*

de stricte combustion ; il est bien évident, en effet, qu'une combustion plus lente produirait encore des gaz alors que le projectile, déjà lancé dans l'espace, aurait échappé à leur action propulsive, et d'un autre côté, il est indispensable que l'émission gazeuse se continue pendant que le boulet progresse dans l'âme, afin de remplir le vide que ce boulet laisse derrière lui.

Mais, sur ce thème général, on peut broder d'innombrables variations : la poudre peut être *à combustion constante*, c'est-à-dire émettre toujours la même quantité de gaz dans le même temps, pendant la durée de sa combustion ; elle peut encore être *progressive*, autrement dit avoir une émission gazeuse croissante, ou *dégressive*, c'est-à-dire produire les gaz avec une vitesse décroissante. Les effets produits, tant sur l'arme que sur le projectile, ne seront pas les mêmes dans tous les cas, et il est nécessaire de savoir régler la combustion de façon à produire, à coup sûr, les résultats désirés. Or, tout ceci se fait aujourd'hui, avec une précision remarquable, en fixant les conditions d'allumage et en choisissant la grandeur et la forme des éléments de la poudre.

Prenons comme exemple une pièce de notre artillerie de campagne ; le dispositif d'allumage

comprend, en premier lieu, une *étoupille*, c'est-à-dire un tube en cuivre rempli d'une composition fulminante et traversé par un fil de cuivre, qu'on nomme *rugueux ;* en tirant le rugueux avec le crochet du tire-feu, on produit des frottements qui provoquent la détonation du contenu fulminant de l'étoupille ; la décomposition se communique ensuite à la gargousse, enfermée dans un sachet de soie, qui contient la masse de la poudre propulsive ; à l'entrée de la gargousse, au contact de l'étoupille, on a disposé une certaine quantité de poudre noire, qui sert d'intermédiaire entre l'étoupille et la poudre sans fumée, formée de brins allongés disposés en fagots à l'intérieur de la gargousse. Tout ceci, qui paraît d'abord assez compliqué, s'explique aisément lorsqu'on connaît le but à atteindre, qui est d'enflammer simultanément et sur toute leur surface tous les brins de la poudre propulsive ; cette inflammation méthodique s'obtient à coup sûr grâce au jet de flamme produit par la poudre noire, qui remplit instantanément de gaz brûlant tout l'intérieur de la gargousse ; on évite ainsi des inflammations localisées, qui produiraient des effets balistiques variables et incertains.

Voici donc le point de départ : toute la poudre

s'enflamme à la fois par toute sa surface ; elle brûle ensuite, par couches concentriques, jusqu'à épuisement de matière active ; on conçoit, dès lors, qu'en faisant varier la forme et les dimensions des éléments de la poudre, on puisse régler à sa convenance la production des gaz ; si l'explosif est en gros morceaux, il brûlera lentement ; la combustion sera d'autant plus rapide que les brins seront plus ténus ; il ne faut pas, toutefois, aller jusqu'à l'extrême finesse ; des grains trop fins ou de la poussière ne laisseraient pas pénétrer dans leurs interstices les gaz inflammants et se comporteraient, à peu de chose près, comme un bloc solide. Ce n'est pas tout ; en modifiant la forme des brins, on peut faire varier, à volonté, la loi d'émission des gaz ; ainsi les explosifs employés dans l'artillerie française sont légèrement dégressifs parce que les lamelles qui les forment diminuent un peu de surface à mesure qu'elles brûlent ; on peut, au contraire, obtenir des poudres progressives en donnant à l'explosif la forme de blocs prismatiques percés de trous, comme les briquettes de charbon de terre ; les trous s'élargissent par la combustion, et la surface d'émission s'accroît d'autant ; ce type est réalisé dans certaines poudres américaines.

*
* *

Tels sont les principes qui dirigent toute la pyrotechnie moderne ; mais, pour transformer en réalités les desiderata qu'ils formulent, il a fallu de longues recherches et des essais sans nombre. La vieille poudre à canon, qui a fait entendre, depuis cinq cent ans, sa voix bruyante sur tous les champs de bataille, était un produit du plus pur empirisme ; c'est empiriquement qu'on l'a modifiée et améliorée, pour arriver à la composition adoptée par tous les peuples civilisés : 75 p. 100 de salpêtre, 12,5 p. 100 de charbon de bois et autant de soufre. Depuis longtemps, on connaissait les défauts de cet explosif; on avait, vers 1840, reconnu la nécessité de renoncer aux grains fins dont l'explosion trop vive fatiguait les armes à feu, et de constituer des blocs comprimés de dimension croissante avec le calibre des pièces; c'était, pour l'artillerie de campagne, la poudre C, et, pour les plus gros canons, la poudre SP (siège et place).

Mais ces poudres, douées d'une puissance balistique médiocre, avaient l'inconvénient de donner, en brûlant, des résidus solides dont une partie s'échappait au dehors en formant la fumée,

tandis que le reste se déposait dans l'arme et l'encrassait rapidement ; cet inconvénient tient surtout à la présence du soufre qui forme avec le potassium du salpêtre un composé solide, le sulfure de potassium ; aussi de nombreux essais furent-ils tentés pour diminuer la proportion de soufre, mais moins on en mettait, plus la poudre s'enflammait difficilement ; pourtant, en employant des charbons roux produits par la calcination incomplète de certains bois, on était parvenu à réaliser des poudres brunes (PB), contenant peu de soufre et dont les blocs prismatiques pouvaient être utilisés avec avantage par la grosse artillerie. Toutes ces recherches s'arrêtèrent net, du jour où la grande découverte de M. Vieille vint offrir à la balistique un nouveau type d'explosif.

Le fulmicoton, qu'on nomme aussi coton-poudre, coton-nitré ou nitrocellulose, avait été découvert en 1846 par le chimiste allemand Schönbein, en traitant le coton par l'acide azotique, auquel on ajoute de l'acide sulfurique, pour absorber l'eau qui se forme dans la réaction ; le coton représente à l'état pur une substance que les chimistes nomment cellulose, parce qu'elle forme les parois des cellules végétales, et qui se retrouve dans le bois, dans le

papier et dans les étoffes. Mais si les propriétés explosives du fulmicoton avaient été signalées par Schönbein lui-même, toutes les tentatives faites pour domestiquer sa puissance étaient restées vaines ; même comprimé en masses compactes, il restait capable de détoner brutalement; c'était donc un explosif brisant, qui trouvait un excellent emploi au chargement des torpilles, mais on n'avait jamais réussi à en faire une poudre propulsive, lorsque les travaux de M. Vieille apportèrent la solution d'un problème qui semblait avoir lassé la patience et l'ingéniosité des inventeurs ; c'est ce que reconnaît un spécialiste allemand très connu, M. Guttman, qui, après avoir fait une large part aux travaux antérieurs, se voit contraint de rendre aux découvertes de notre compatriote un hommage d'autant plus précieux qu'il est donné plus à regret : « Toutes ces tentatives, dit-il, furent éclipsées par l'invention de Vieille qui, en 1884, gélatinisa très soigneusement de la nitrocellulose et en fit des feuilles qu'il découpa en rubans ou en petits losanges. » Et je ne puis moins faire que de rapporter ici les justes et nobles paroles que M. L.-I. Simon[1] ajoutait à cette citation du

1. L.-J. Simon. *La poudre B* (*La Revue du mois*, décembre 1911).

technicien allemand : « C'est à dessein, dit-il, que j'emprunte au plus compétent des spécialistes étrangers cette appréciation flatteuse de l'invention de notre compatriote. Elle met en la place qu'il mérite dans l'œuvre collective, l'ingénieur qui, à peine âgé de trente ans, sans le secours d'aucun hasard ni d'aucune collaboration, par l'effet d'une méthode parfaite au service d'une haute intelligence, dotait son pays d'une découverte qui le rendit maître de l'heure pendant deux ans. Dans les discussions fécondes ou stériles, calmes ou passionnées que suscite l'obsédant souvenir d'une affreuse catastrophe, il serait d'une monstrueuse ingratitude d'oublier le tribut de reconnaissance dû à ce grand savant et à ce grand Français. » Il serait tout aussi injuste d'oublier d'associer au nom de Vieille celui de notre grand chimiste Berthelot, qui appliqua sa science et son génie à mettre au point l'emploi des nouveaux explosifs. C'est grâce à Berthelot et à Vieille que les poudres à la nitrocellulose purent dès 1885, être adoptées pour l'armement français. Le général Boulanger était alors au printemps de sa gloire ; l'emballement populaire voyait en lui le héros d'une future revanche, et c'est en son honneur que le nouveau produit reçut le nom de poudre B.

Je n'ai point le dessein de rappeler dans le détail les opérations qui transforment la cellulose en poudre B ; je me contenterai d'en indiquer le principe. La réaction de Schönbein permet, en réalité, d'obtenir, suivant la concentration des acides employés et la durée de l'opération, plusieurs espèces de fulmicoton, plus ou moins riches en produits azotés. Le fulmicoton le plus riche en azote est aussi le plus puissant au point de vue balistique, mais il présente l'inconvénient d'être insoluble dans le mélange d'alcool et d'éther ; ce mélange dissout, au contraire, la cellulose moins fortement nitrée, en donnant du collodion, qu'on employait jadis pour faire des plaques photographiques, et qui sert encore aujourd'hui pour fermer les coupures. Pourtant cette insolubilité n'est pas absolue ; il ne faut pas oublier que les composés complexes de la chimie organique n'ont pas les propriétés tranchées qu'on rencontre en chimie minérale ; si on fait macérer dans du collodion le fulmicoton insoluble, celui-ci, sans doute par la contagion de l'exemple, s'émiette en fragments impalpables qui s'enrobent de collodion en formant un magma pâteux que le malaxeur triture et rend homogène ; on obtient ainsi, non une solution comparable à celle du sucre dans l'eau, mais quelque

chose d'analogue aux gommes et aux gélatines, en un mot, un *colloïde*. La matière, amenée par évaporation à la consistance voulue, est soumise à l'action d'une presse terminée par une filière, d'où elle sort, comme les pâtes d'Italie, en longs rubans qu'on met sécher sur des claies en bois ; on obtient ainsi, par l'évaporation presque intégrale de l'alcool et de l'éther, une sorte de corne blonde, translucide et élastique ; c'est la matière première de la poudre B; en France, cette matière forme des rubans plats dont l'épaisseur varie depuis 7 dixièmes de millimètre pour la poudre à fusil [1] BF jusqu'à 7 millimètres pour les poudres BM destinées à la grosse artillerie de marine.

Les autres nations, qui se sont hâtées d'imiter, parfois en les améliorant, nos procédés de fabrication, donnent à leurs poudres des formes différentes et qui probablement, ne sont pas plus avantageuses ; on emploie des filaments et des cylindres pleins en Angleterre, des lames et des cylindres creux en Allemagne, des cordons à section carrée en Italie et, aux États-Unis, des cylindres courts et perforés. Un progrès plus important, et qui serait essentiel s'il n'était ba-

1. Ces rubans sont ensuite découpés en petits carrés de deux millimètres de côté.

lancé par les inconvénients, consiste à accroître la puissance balistique de la nitrocellulose en y incorporant, en proportion variable, un explosif plus redoutable encore, la nitroglycérine ; on obtient ainsi des compositions, dont l'aspect rappelle celui de notre poudre B, et qui, sous les noms de poudre Nobel, de balistite, de cordite et de filite, sont employées par l'artillerie de plusieurs nations ; ces explosifs complexes ont leurs avantages ; une meilleure proportion des comburants et des combustibles y donne une réaction plus complète ; par suite, l'élévation de température est plus grande que dans la poudre B et l'utilisation mécanique des gaz dégagés y est plus avantageuse ; en revanche, ils soumettent les canons à des efforts et à une usure qui réduisent notablement leur durée, et c'est pour cela que les tirs d'exercice ne peuvent être effectués qu'à charge réduite sous peine de mettre hors de service, en temps de paix, ces terribles machines à tuer que les peuples civilisés tiennent en réserve pour les guerres futures.

*
* *

L'apparition des poudres colloïdales a transformé la tactique moderne : l'homogénéité de

leur structure, la régularité de leurs formes ont permis des études techniques plus précises et plus serrées ; mais surtout, l'accroissement de la puissance propulsive a permis, d'emblée, d'augmenter la vitesse initiale des projectiles, par suite leur portée et la tension de leur trajectoire : dès 1885, la nouvelle poudre permettait d'obtenir le même effet propulsif que la poudre noire, avec une charge trois fois moindre, et on pouvait, sans rien changer aux armes, accroître de cent mètres la vitesse initiale sans atteindre des pressions dangereuses. En même temps, il se trouvait que la décomposition de la nitrocellulose donnait uniquement des produits gazeux, de telle sorte qu'elle n'encrassait pas la pièce et que l'explosion se produisait sans fumée; ce nouvel avantage, obtenu par surcroît, frappa surtout le public, et c'est pour cela que le nouvel explosif fut désigné couramment sous le nom de poudre sans fumée.

Mais la médaille avait son revers : notre pays en a fait, plus qu'aucun autre, la douloureuse expérience. Les poudres colloïdales ne détonent jamais, mais elles s'altèrent et cette altération, en s'emballant brusquement, peut aller jusqu'à en provoquer la déflagration spontanée ; le fait a été établi par de nombreux exemples, et dans

des conditions qui n'admettent aucune hypothèse d'inflammation accidentelle ou de malveillance ; tel fut, entre autres, le cas de cette caisse de poudre qui prit feu, en plein jour, dans les rues de Marseille, sur le camion qui la transportait de la gare au quai d'embarquement.

Voici en quels termes un spécialiste, M. Berger, décrit cette avarie de la poudre B : « La décomposition s'effectue dès l'origine. L'observation directe de l'aspect et des propriétés physiques des bandes de poudre ne décèle rien de cette altération pendant très longtemps et, en fait, on a cru très sincèrement à la parfaite stabilité du produit plusieurs années après sa découverte. Puis certaines altérations, d'abord localisées, apparaissent ; par endroits, des taches se forment, qui s'élargissent et dégénèrent en abcès. Ces points malades ont rapidement une réaction acide, due à l'acide nitrique, qu'accompagne l'acide nitreux. La maladie s'étend, il y a une véritable contamination de la partie malade vers les parties restées saines de la bande et de la bande malade vers les bandes voisines. Finalement, toute la masse se ramollit, suinte l'acide ; la poudre a subi ce qu'on appelle la décomposition pâteuse. Ce qui caractérise cette contamination, c'est sa rapidité relative. Alors que la première

période, pendant laquelle la poudre était saine, se chiffrait par années, la période de destruction se compte en mois, presque en jours. Or, dès que la poudre est acide, elle est dangereuse et susceptible de s'enflammer spontanément. »

La révélation de cette propriété, qui fut suivie des plus épouvantables confirmations, plongea les spécialistes dans de terribles perplexités. On ne pouvait, ni revenir aux anciennes poudres, ni détruire des approvisionnements nécessaires et qui représentaient plusieurs centaines de millions, ni laisser s'accomplir, les bras croisés, l'œuvre de destruction et de mort. On décida, en premier lieu, de surveiller méthodiquement les approvisionnements, de façon à prévoir l'altération avant qu'elle ne fût devenue dangereuse; on avait, pour cela, une règle ingénieuse : on chauffait 10 grammes de la poudre suspecte dans un tube porté à 110 degrés et on mesurait le temps qu'elle met, dans ces conditions, à se décomposer en émettant des vapeurs azotées qui colorent en rouge le papier bleu de tournesol; ce temps s'appelle *la vie* de la poudre à 110 degrés, et on peut déduire de cette donnée la durée probable de la substance par la fameuse « loi de corrélation » : la vie d'une poudre, en heures à 110 degrés, est égale à sa vie en jours à 75 degrés,

et à sa vie en mois à 40 degrés. Un tel résultat peut être exact, en moyenne, mais il faut compter avec les exceptions, car ce sont elles qui font les catastrophes ; or, il suffit qu'un brin microscopique, échappé à l'analyse, soit défectueux dans plusieurs tonnes d'une poudre saine, pour que ce brin produise une déflagration générale.

Puisqu'il était si difficile de prévoir, on chercha à guérir ; nos poudres connurent les pratiques du *radoubage*, où les lots suspects, repris par le dissolvant alcoolique et éthéré, recevaient d'un nouveau traitement une sorte de remise à neuf; mais cette virginité reconquise gardait la trace des anciennes pollutions, et les poudres radoubées justifièrent mal la confiance qu'on avait mise en elles.

Il fallait trouver mieux : M. Vieille, constatant que l'altération des poudres accompagnait l'évaporation progressive de l'alcool qu'elles avaient retenu lors de leur préparation, pensa qu'en incorporant à ces poudres un alcool moins volatil, on pourrait prolonger la vie de l'explosif : ce fut l'origine des poudres à 2 p. 100 d'alcool amylique (AM_2), adoptées en 1896 ; la proportion d'alcool amylique fut portée ultérieurement à 8 p. 100 dans les poudres AM_8, et les résultats obtenus furent nettement favorables ; la poudre

nouvelle résistait mieux que l'ancienne, mais elle finissait toujours par éprouver la funeste avarie.

C'est à ce moment qu'apparut une solution nouvelle, empruntée à l'étranger : « Dès l'année 1896, nous apprend M. Berger, c'est-à-dire au moment où le service des poudres et salpêtres proposait et faisait adopter l'alcool amylique comme stabilisateur, le service de l'artillerie de terre se proposait également de chercher une solution au problème de la conservation des poudres B. L'attention du capitaine Lepidi, de la poudrerie du Bouchet, avait été attirée sur la diphénylamine, dont il avait reconnu la présence en 1892 dans une poudre Nobel dont on lui avait confié l'étude. Une traduction mentionnait, en outre, son emploi dans la Wurfelpulver de Rothweil. Sur l'initiative du capitaine Lepidi, un lot contenant 2 p. 100 de diphénylamine fut fabriqué en 1896 à la poudrerie du Bouchet ; c'est sur ces poudres que portèrent les essais poursuivis parallèlement par la poudrerie et surtout par la Commission des poudres de Versailles. » Ainsi, un hasard heureux nous avait mis sur la voie d'un procédé nouveau, que l'étranger comptait bien garder pour lui ; mais il s'écoula plusieurs années avant qu'on s'accordât sur sa valeur. Le

service des poudres et salpêtres, qui venait d'adopter le stabilisateur à l'alcool amylique, mit longtemps à se laisser convaincre ; il ne faut pas s'en montrer surpris, car on n'a pas le droit, sur une simple hypothèse, d'introduire une modification qui peut être plus nuisible qu'utile, et, d'autre part, il y a des expériences qui réclament nécessairement le concours du temps ; on peut étudier rapidement la stabilité des poudres à 80 ou 100 degrés, mais entre 30 et 40, il faut attendre des mois avant d'avoir un résultat, et des années entre 20 et 30 degrés ; c'est pour cela que des échantillons de poudre AM et D sont conservés depuis 1903, à Versailles, Constantine et Biskra, c'est-à-dire dans les conditions climatériques les plus dissemblables. Ainsi, malgré les catastrophes accumulées, il faut agir avec patience et sang-froid ; mais, dès à présent, les résultats acquis ont mis tout le monde d'accord ; en octobre 1910, la Commission mixte de fabrication, composée de représentants du service producteur des poudres et salpêtres, et des services consommateurs de la Guerre et de la Marine, présidée par M. l'Inspecteur général Vieille, a proposé à l'unanimité l'emploi de la diphénylamine pour la stabilisation de toutes les poudres.

Cette poudre nouvelle, la poudre D, n'apparaît

pas, même à ses plus chauds partisans, comme une panacée, mais elle présente des avantages de premier ordre. La diphénylamine agit à la fois comme stabilisateur et comme indicateur, et ces deux rôles sont également nécessaires. Elle stabilise la poudre en absorbant les vapeurs nitreuses à mesure qu'elles sont émises ; or, ce sont ces vapeurs qui, en se répandant dans la masse d'explosif, généralisent l'avarie produite en un point. D'un autre côté, on peut doser fort exactement la proportion de diphénylamine contenue dans la poudre ; dès que l'altération commence, cette teneur s'abaisse et les chimistes ont ainsi, pour leurs essais, une base rigoureuse et une méthode sensible ; mais il y a plus. Dans les anciennes poudres, l'altération n'était visible que lorsqu'elle était très avancée, de telle sorte que rien ne différenciait, à l'œil, une poudre saine d'une poudre suspecte. Au contraire, la diphénylamine, en absorbant les vapeurs nitreuses, prend une coloration d'un noir verdâtre, qui vire progressivement au brun ; enfin, on voit apparaître des taches jaunes, mais il est temps alors d'agir et de retirer les poudres du service ou de les consommer à bref délai ; ces trois stades d'altération permettent donc une surveillance très efficace, puisqu'elle s'applique, non

pas à des moyennes, mais à chaque brin de nitrocellulose ; le noircissement est même une indication tellement précoce, qu'elle risque d'éveiller une méfiance injustifiée envers des poudres qui sont encore en excellent état, et c'est pour cela qu'en Allemagne, la poudre à la diphénylamine est noircie artificiellement, afin de dissimuler ce commencement d'altération.

*
* *

Ce que j'ai dit jusqu'ici pourrait laisser croire que les explosifs détonants ne sont employés qu'à titre exceptionnel ; or, c'est le contraire qui est vrai ; les explosifs industriels, dont l'emploi est, heureusement, plus fréquent que celui des poudres de guerre, travaillent par détonation ; leur production annuelle s'élève à soixante millions de kilogrammes et représente une valeur de plus d'un milliard de francs ; c'est qu'ils sont les grands terrassiers des temps modernes ; ils rendent possible le percement des tunnels, l'exploitation des mines, et ce sont eux, aujourd'hui, qui achèvent de creuser le canal de Panama. Ainsi, en cette matière, ce sont les plus violents qui sont les plus utiles ; il est vrai que la guerre utilise le coton-poudre pour la charge

des torpilles, tandis que la mélinite, jadis préconisée par Turpin, et que d'autres nations emploient sous le nom de lyddite, sert à déterminer l'explosion des obus, schrapnels et boîtes à mitraille ; la mélinite, on le sait, n'est autre que l'acide picrique, dérivé azoté du phénol, qu'on verse fondu dans le ventre des obus.

Mais pour deux ou trois détonants qui ont mal tourné, combien de probes et laborieux ouvriers ! Car ils sont des centaines, et leur grand nombre n'a pas pour unique origine la concurrence des producteurs et la fantaisie qui leur fait donner des noms différents à des produits identiques. En réalité, la variété des explosifs correspond à la diversité des besoins industriels. Les uns sont appelés à travailler sous l'eau, ou en terrain détrempé ; ils doivent ne rien perdre de leurs propriétés au contact de l'humidité. D'autres sont utilisés dans les mines grisouteuses ; ce sont les explosifs « de sûreté », qui ne doivent, en aucun cas, provoquer l'inflammation du grisou. Ceux qu'on emploie dans les endroits difficilement aérés et où travaillent des ouvriers, ne doivent pas dégager de produits délétères [1] ; enfin, dans les travaux

1. L'attention se porte actuellement sur des explosifs qui

de mines, la rapidité de l'explosion doit être graduée, en même temps que la charge d'explosif, suivant les effets à atteindre ; d'une façon générale, plus la détonation est brusque, plus l'effet est localisé ; veut-on percer un trou dans une muraille, sans en disloquer l'ensemble ni en ébranler les fondations ? Il suffira d'une charge réduite d'un explosif très brisant ; de même, pour abattre un arbre, un chapelet d'explosif brisant, placé autour du tronc, aura vite fait de le couper net. Au contraire, pour les travaux de mines et de terrassement, on a généralement besoin de disloquer de grandes masses de terrain, afin que l'ouvrier n'ait plus ensuite qu'à procéder, avec le pic ou la pioche, à l'abatage des décombres ; ceci exige des explosifs plus lents, qui prennent le temps de soulever les roches et d'introduire leurs gaz dans les fissures ; encore cette lenteur est-elle toute relative, car il s'agit ici de millièmes de seconde ; un explosif trop paresseux perdrait tout le bénéfice de sa force expansive, en laissant à la chaleur le temps de s'échapper au dehors.

La description de ces diverses variétés d'ex-

réalisent parfaitement cette condition ; ils sont formés d'aluminium en poudre et d'oxygène liquide ; récemment essayés, dans les carrières de Vaugirard, ils se sont montrés deux fois plus puissants que la poudre noire.

plosifs remplirait aisément des volumes. Sans me laisser entraîner par mon sujet, je voudrais seulement consacrer quelques lignes au plus connu de tous ces produits, à celui qui a fait la fortune la plus belle et la plus méritée ; la dynamite a joué un rôle immense dans le travail d'aménagement de notre planète, et elle doit son étonnant succès à ce qu'elle réunit des qualités, en apparence, contradictoires, étant à la fois détonante et progressive ; sa brusque détonation, provoquée par une amorce de fulminate, donne en effet des gaz composés, acide carbonique et vapeur d'eau, mais la température initiale est tellement élevée que ces gaz sont presque entièrement dissociés ; ils se recombinent peu à peu et cette combinaison dégage de la chaleur qui, en compensant celle qui est dissipée par conductibilité, prolonge et soutient l'effort propulsif des gaz ; ainsi, l'action de ces gaz dure assez longtemps pour leur permettre de disloquer les roches sur un périmètre étendu autour du trou de mine.

Mais l'histoire de la dynamite n'est pas moins intéressante que ses propriétés, car elle montre, une fois de plus, que les grandes inventions requièrent la collaboration du hasard et de cette longue patience qui est le génie des inventeurs.

On insiste souvent sur le rôle du hasard, mais on oublie tous les efforts, poursuivis pendant des années, et qui ont fait apparaître l'heure du Destin. L'œuvre des Nobel, le père et le fils, s'étend sur quatre-vingts ans, et ce n'est qu'à la fin qu'elle fut couronnée par le succès et récompensée par la fortune. Emmanuel Nobel, ingénieur suédois, s'était voué, dès 1830, à l'étude des explosifs ; il établit, pour le gouvernement russe, les premiers types pratiques de torpilles sous-marines ; mais ces travaux, qui le firent passer par des alternatives de fortune et de misère, étaient particulièrement dangereux à une époque où on ignorait la technique prudente des opérateurs modernes ; l'expérimentateur pouvait s'attendre alors à ce que chaque moment fût le dernier de sa vie. La demeure d'Emmanuel Nobel et les maisons voisines furent ébranlées par tant d'explosions, qu'il fut contraint de continuer ses essais sur un chaland, ancré à quelque distance du rivage. Plus tard, son laboratoire d'essais d'Heleneborg fut détruit par une formidable explosion, qui coûta la vie à plusieurs personnes, parmi lesquelles était son plus jeune fils Oscar, dont on trouva, dans les décombres, le corps atrocement mutilé. C'est au milieu de ces épouvantes qu'Emmanuel Nobel et son fils Alfred, travail-

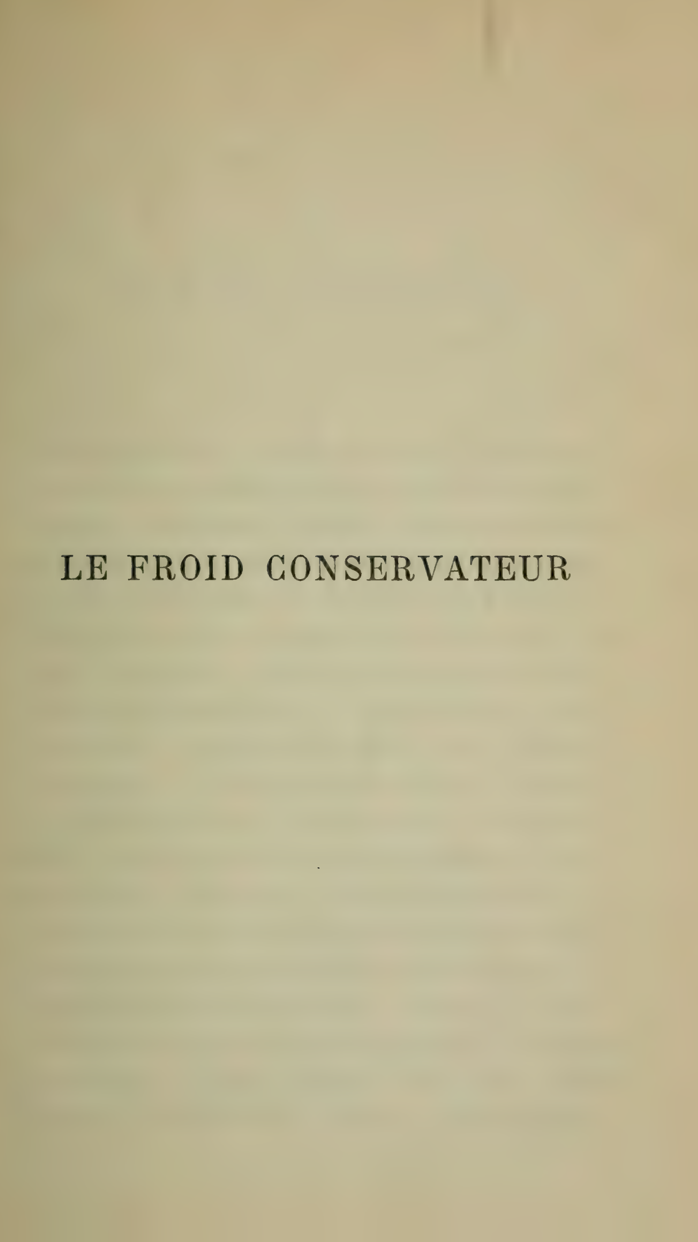
lant sans relâche, s'attachèrent spécialement à la nitroglycérine, découverte en 1847 par l'Italien Sobrero, et plus puissante encore que le coton-poudre ; mais la nitroglycérine était liquide, et tellement irritable, qu'elle explosait quelquefois par le frottement du bois contre le bois ; ils essayèrent de la rendre plus maniable en la faisant absorber par la poudre noire, mais celle-ci n'en prenait que 10 p. 100 de son poids ; l'avantage n'était pas suffisant pour compenser l'instabilité du produit ; c'est après des années d'essais infructueux que le hasard vint au secours d'Alfred Nobel : un jour, en 1863, un peu de nitroglycérine avait coulé d'une tourie fêlée, et s'était répandu sur le produit dont on se servait alors pour emballer les touries et pour les préserver contre les chocs ; cette matière était une terre siliceuse, nommée *kieselguhr*, qui était constituée en grande partie par les enveloppes d'algues fossiles, qu'on nomme les diatomées ; le mélange de nitroglycérine et de kieselguhr avait formé une sorte de mortier, et Nobel constata qu'il pouvait être manipulé sans danger ; la dynamite était trouvée et la fortune de Nobel assurée ; il ne restait plus qu'à donner à la terre siliceuse toute sa puissance d'absorption, en isolant par lavage les diatomées microscopiques, et

en chassant l'humidité intérieure par une légère calcination ; en malaxant à la main cette matière poreuse avec la nitroglycérine, on lui faisait absorber des proportions considérables d'explosif, pour lequel elles constituaient le meilleur des emballages ; la pâte, tassée dans des moules cylindriques, puis enveloppée de papier paraffiné, forme ces cartouches explosives, que tant de mains brutales et inexpérimentées manient aujourd'hui sans accidents.

Une autre fois, en 1876, Nobel fut heureusement servi par le hasard ; il s'était coupé le doigt et avait envoyé chercher du collodion pour couvrir la blessure ; la souffrance, qui l'empêchait de dormir, ramena ses pensées sur l'objet constant de ses préoccupations, et il se rendit, à deux heures du matin, dans son laboratoire, pour essayer d'incorporer le fulmicoton, contenu dans le collodion, à la nitroglycérine ; il y réussit et obtint une matière plastique où s'associaient, en se complétant, les activités des deux explosifs ; ce fut l'origine de la *dynamite-gomme*, plus puissante encore que l'ancienne dynamite ; plus tard, les travaux de Vieille éveillèrent en lui l'idée d'employer ce produit comme poudre de guerre ; il constata que, pour une teneur suffisante en nitroglycérine, on obtenait un explosif

non détonant : ce fut la *poudre Nobel*, ou *balistite*, qui fut adoptée par l'Italie, l'Allemagne et plusieurs autres pays, et qui présente d'étroites analogies avec la cordite anglaise.

C'est ainsi qu'une grande industrie, utile pendant la paix, nécessaire pendant la guerre, est née du labeur incessant d'Alfred Nobel. Cet homme, dont la vie avait été un bel exemple de persévérance et d'énergie, a voulu donner, en disparaissant, une grande leçon de sagesse ; en consacrant sa fortune tout entière à récompenser les grandes découvertes et les nobles efforts, il a montré qu'il se souvenait de cette belle parole de Pasteur : « C'est l'ignorance qui sépare les hommes et la science qui les rapproche. »



LE FROID CONSERVATEUR

LE FROID CONSERVATEUR

Le 21 septembre 1876, un navire français, le *Frigorifique*, quittait Rouen pour Buenos-Ayres; l'ingénieur normand Charles Tellier avait disposé à bord des machines réfrigérantes qui permettaient d'y conserver la chair de six bœufs et de douze moutons. Quatre mois plus tard, au terme du voyage, cette délicate cargaison atteignait sa destination en état de parfaite conservation. Ainsi, la preuve était faite qu'on pouvait transporter, en s'aidant du froid, les aliments les plus altérables et les retrouver, au moment voulu, aussi frais qu'à l'embarquement. Tellier entrevoyait déjà toutes les applications de la méthode qu'il venait de créer, et il était en droit d'espérer que ses compatriotes, instruits par lui, se hâteraient d'en tirer profit..., mais il se trompait en cela : personne ne bougea, sauf quelques producteurs qui, par crainte de la concurrence étrangère, décrièrent à l'envi les nouveaux pro-

cédés ; les commanditaires du *Frigorifique* refusèrent d'engager leurs fonds plus avant ; puis la France s'enferma dans une muraille de protection douanière et se mit à vivre repliée sur elle-même ; l'effort de Tellier s'enlisa peu à peu dans l'indifférence et dans l'oubli et l'homme qui eût mérité la gloire et la fortune tomba dans une noire misère. Voilà comment a débuté une des plus grandes, une des plus fécondes idées des temps modernes ; voilà de quelle monnaie l'humanité a payé un de ceux qui ont fait le plus pour elle ; c'est le sort commun des précurseurs ; il est même de pires destins, car Tellier doit à sa longévité d'avoir entendu sonner l'heure de la justice. Tout d'un coup, il y a cinq ou six ans, ceux qui avaient fait triompher ses idées se sont souvenus de ce vieillard, qui vivait ignoré et pauvre, et ils se sont donné à eux-mêmes la joie de lui faire rendre hommage ; une place d'honneur fut réservée, dans les bibliothèques des frigoristes, à l'ouvrage où Tellier raconte sans amertume, l'histoire de ses efforts, de ses inventions et de ses déceptions[1] ; au congrès frigorifique, tenu à Paris en 1908, six mille assistants saluèrent le vieil inventeur

1. *Le Frigorifique, histoire d'une invention nouvelle*, avec préface par Ch. d'Arsonval, Delagrave, éditeur.

du nom de « Père du froid » ; des récompenses académiques furent obtenues pour lui ; enfin, au début de l'année 1912, le ruban rouge est venu prouver à ce vieillard de quatre-vingt-quatre ans que son effort n'avait pas été perdu ; mais la vie de Tellier montre, une fois de plus, qu'il ne faut pas compter sur le succès d'une idée, même féconde et pratique, si on n'arrive pas à l'instant favorable et si on ne dispose pas des capitaux suffisants pour soutenir la lutte, non seulement contre l'indifférence et la routine, mais aussi contre les envieux embusqués à chaque pas et contre toutes les puissances intéressées au maintien du *statu quo*.

Le problème que Tellier s'était posé, et dont il avait indiqué la solution, se présente chaque fois qu'on cherche à conserver les matières qui s'altèrent dans les conditions ordinaires, et que les techniciens appellent les « denrées périssables » ; cette altération peut tenir, soit à des réactions chimiques spontanées, comme dans les poudres à la nitrocellulose ; soit à l'action de certains parasites (c'est ce qui se produit pour les fourrures), soit enfin, et c'est le cas le plus important, aux fermentations et aux putréfactions de toutes sortes qui sont l'œuvre des

infiniment petits. Conserver tous ces produits, c'est étendre leur emploi, non seulement dans le temps, mais encore dans l'espace, c'est permettre aux diverses saisons comme aux divers climats, d'échanger leurs produits ; alors, la surproduction vient combler les trous de la disette et l'étiage des prix se maintient à un niveau sensiblement uniforme. Cet équilibre de la production et de la consommation n'a rien de chimérique puisque, dès à présent, l'industrie frigorifique nous donne le moyen de le réaliser.

Bien entendu, le problème de la conservation des aliments ne date pas d'aujourd'hui ; je me garderai de médire des salaisons, des viandes fumées, des confitures dont nos grand'mères prévoyantes se transmettaient les recettes, ni même des conserves enveloppées dans une peau de fer-blanc, que l'industrie nous livre en abondance. Tous ces procédés ont leurs avantages ; ils peuvent être employés couramment, à petite échelle, sans exiger de puissantes installations ni une organisation compliquée ; mais ils présentent tous un grave inconvénient : ils modifient profondément le goût et même la nature des denrées qu'ils conservent ; les matières organiques, et spécialement les aliments, sont tellement altérables qu'une fois salées, fumées

ou cuites, elles ont cessé d'être elles-mêmes ; comme les microbes, les aliments sont des cellules de matière vivante ; tout ce qui agit sur le microbe agit aussi sur l'aliment ; vouloir stériliser les denrées alimentaires, c'est agir comme l'ours avec son pavé ; on tue l'infiniment petit, mais on écrase du même coup ce qu'on voulait protéger contre lui.

Le froid agit d'une façon toute différente ; il ne tue pas, il immobilise ; il suspend toutes les fermentations, mais, s'il est employé avec discernement, il n'altère pas la matière vivante. On connaît l'histoire de ces mammouths des âges quaternaires, enfouis dans les glaces de la Sibérie depuis des centaines de siècles et dont la chair ramenée au jour est encore assez bien conservée pour nourrir les chiens des Samoyèdes. Mais le froid a l'envers de ses qualités ; comme il endort sans détruire, dès que son action cesse, la vie reprend et la décomposition commence.

Avant d'aller plus loin, il faut sortir des généralités ; l'action du froid peut être appliquée suivant des modes différents, qui sont loin de donner des résultats identiques ; c'est pour les avoir, au début, confondus ou employés mal à propos, qu'on s'est heurté à des insuccès dont

une critique malveillante s'est empressée de tirer parti. Il est donc essentiel d'insister sur la profonde différence qui sépare, au point de vue pratique, la *congélation* et la simple *réfrigération*.

Les substances soumises à la congélation sont maintenues à une température inférieure à zéro, et qui s'abaisse parfois jusqu'à — 10°; comme les cellules animales ou végétales sont formées, en majeure partie, d'eau, cette température suffit pour faire passer le suc cellulaire à l'état de glace : un morceau de viande congelée est dur comme un bloc de pierre ; son aspect et sa couleur sont complètement modifiés, mais sous cette forme, il pourrait se conserver pendant des siècles ; le froid emmagasiné par les matières congelées est suffisant pour permettre de les sortir des glacières et de les manipuler quelques instants à l'air libre sans que leur température remonte au-dessus de zéro, et cet avantage est d'un grand intérêt pratique puisqu'il facilite les transbordements ; mais la médaille a son revers ; remarquons en effet que la matière vivante est emballée dans une série de membranes qui la protègent contre les diverses causes d'altération ; en dehors de l'épiderme, qui constitue l'enveloppe générale, chaque organe, chaque

cellule même a sa protection spéciale ; que ces enveloppes viennent à être déchirées, on comprend sans peine ce qui en résultera : l'air, les microbes, entreront sans obstacle et l'œuvre de destruction s'accomplira avec une rapidité foudroyante : c'est ainsi qu'un fruit froissé par les heurts du voyage et par la manutention s'altère en quelques heures tandis qu'il se conserve pendant des mois s'il est parfaitement sain. Or, la congélation agit sur les tissus vivants comme sur les tuyaux de plomb de nos canalisations ou sur les pierres gélives de nos maisons : la formation de la glace s'accompagne d'une augmentation brusque de volume qui brise les parois, même les plus solides, et à plus forte raison les minces tissus de la matière organisée ; de là résulte une dépréciation sérieuse du produit qui, même décongelé progressivement et avec soin, n'a pas gardé toutes les qualités et la puissance de conservation des produits frais. La congélation est donc un procédé brutal et commode, qu'on n'emploie qu'à condition de consentir à un certain déchet sur la valeur des matières conservées ; on l'applique, par exemple, au transport en Angleterre des viandes de l'Argentine, de la Nouvelle-Zélande et de l'Australie et le « frozen meat » joue un rôle important

dans l'alimentation des classes anglaises peu fortunées.

Tout autre est la réfrigération ; les produits à conserver sont maintenus frais par leur séjour dans des locaux dont la température ne s'abaisse jamais à zéro, et ne s'élève jamais au-dessus de cinq ou six degrés ; dans ces conditions, les transformations de la matière vivante sont tellement ralenties, qu'il faut des mois pour obtenir un changement appréciable ; encore ce changement n'est-il pas toujours défavorable ; ainsi, les viandes réfrigérées deviennent peu à peu *rassises*, comme on dit en terme de boucherie, c'est-à-dire qu'elles subissent, au cours des semaines, une transformation qui se produit spontanément, à la température ordinaire, quelques heures après l'abatage ; des spécialistes affirment même qu'une viande de second choix devient, par la réfrigération, de première qualité ; en tout cas il est aisé de comprendre que, les tissus n'ayant pas été congelés, le produit retrouvera, après retour à la température ambiante, la même saveur, le même aspect et la même puissance de conservation qu'à l'état frais.

Tout cela serait parfait, si le procédé n'était pas d'une application assez délicate ; mais la marge des températures à maintenir est assez

étroite, et comme la congélation n'est plus là pour former « volant » et réserve de froid, la moindre imprudence, le moindre défaut de surveillance pourront se payer par une altération du produit. Ce n'est pas tout : une question tout aussi importante que celle de la température est celle de l'humidité. Si les produits sont conservés dans un air parfaitement sec, ils se dessèchent peu à peu ; les fruits se rident ; les viandes se racornissent et se momifient, et, comme tous ces produits se vendent au poids, cette dessiccation leur fait subir une double dépréciation. Supposons, au contraire, que l'air soit saturé d'humidité ; des variations très légères et toujours inévitables de température suffisent pour provoquer des condensations liquides qui suintent à la surface des matières conservées et les recouvrent d'une rosée peu favorable à leur conservation ; un quartier de viande soumis pendant plusieurs semaines à ce régime sera délavé et comme lessivé ; toute l'eau qui se condense à sa surface et qui s'écoule ensuite sur le sol dissoudra les sucs cellulaires, et le transformera en une masse spongieuse, sans goût ni valeur nutritive. Ainsi, l'effet d'une humidité extrême est encore plus déplorable que celui d'une extrême sécheresse ; en réalité, c'est sur-

tout à l'humidité que sont dus la plupart des insuccès dans l'emploi de la réfrigération.

Tout ceci montre que l' « état hygrométrique » de l'air doit être dosé aussi soigneusement que sa température, dans les chambres de réfrigération. L'emploi de ce procédé exige donc une série de précautions assez minutieuses, mais que les techniciens savent parfaitement réaliser ; en retour, il donne, à coup sûr, des produits de choix, et ce résultat est essentiel à notre époque et dans notre pays où personne n'entend consommer des aliments de seconde qualité.

*
* *

On voit dans quels termes l'industrie pose à la science le problème du froid. Il ne s'agit pas, comme dans les recherches de laboratoire qui ont été poussées si loin dans ces dernières années, d'obtenir des températures très basses ; on n'a que faire des 180 degrés au-dessous de zéro que l'évaporation de l'air liquide donne si commodément, non plus que des 270 degrés de froid que M. Kamerlingh Onnes obtient, à Leyde, par l'évaporation de l'hélium liquéfié ; mais on a besoin de produire et de maintenir économiquement des températures voisines de zéro.

Ainsi posé, le problème paraît facile à résoudre par l'emploi de la glace ; la glace fond précisément à zéro et la grande quantité de chaleur qu'elle absorbe en fondant permet de l'utiliser commodément comme réfrigérant ; on sait aussi qu'il suffit de l'additionner de matières salines, comme le chlorure de calcium ou le vulgaire sel de cuisine, pour obtenir des températures plus basses, qui peuvent descendre jusqu'à — 20 degrés, et même au-dessous : c'est le principe des mélanges réfrigérants, en usage dans nos glacières, et que les Chinois connaissent depuis huit cents ans. La glace apparaît, à ce point de vue, comme « l'envers de la houille » ; elle engendre le froid comme la houille produit le chaud ; c'est pour cette raison qu'on utilise, dans les pays tropicaux, de véritables poêles à glace qui « dégagent du froid », ou, pour s'exprimer en termes plus scientifiques, qui absorbent la chaleur ambiante et maintiennent, à l'intérieur des habitations, une température supportable ; ces appareils commencent à rendre, surtout dans les hôpitaux coloniaux, des services appréciés.

Or, de même qu'il existe des mines de houille, il existe de véritables mines de glace, et celles-ci ont le double avantage d'être à fleur de sol, ou à fleur d'eau, et d'être inépuisables, puisque

chaque hiver reforme la calotte glacée des deux pôles. Il n'y a donc aucune absurdité à envisager l'exploitation de ces mines de froid ; en fait, la glace des lacs suédois, découpée en blocs gros comme des pierres de taille, parvient en été dans nos climats tempérés. On ne voit pas ce qui s'opposerait à un emploi généralisé des glaces polaires ; mais les transformations économiques ne sont pas régies par la raison pure, et la logique des faits n'est pas toujours celle des idées. Actuellement, la solution qui l'emporte apparaît, au premier abord, comme paradoxale, puisque le charbon, qui sert à produire la chaleur, sert aussi à engendrer le froid ; pourtant ce paradoxe s'explique sans peine, lorsqu'on se rend compte du fonctionnement des machines frigorifiques.

Il n'est personne qui, en versant sur sa main quelques gouttes d'un liquide volatil comme l'éther ou l'essence de pétrole, n'ait éprouvé une vive sensation de froid due à l'évaporation. Ce phénomène est général, et l'eau le présente comme les autres liquides, mais il est d'autant plus net que l'évaporation est plus rapide ; c'est pour cette raison que les gaz liquéfiés, comme l'ammoniac ou l'anhydride sulfureux, se présentent comme des réfrigérants de choix ; d'ailleurs, les physiciens ne se sont pas fait faute de mesu-

rer la quantité de chaleur qu'on peut emporter par l'évaporation : ainsi, un kilogramme d'anhydride sulfureux liquide absorbe, en se volatilisant, cent grandes calories, c'est-à-dire assez de chaleur pour abaisser de un degré la température de cent kilogrammes d'eau, ou pour faire un kilogramme de glace avec un kilogramme d'eau prise à 20 degrés. Imaginons, dès lors, deux réservoirs métalliques, hermétiquement clos, et plongés dans des bacs remplis d'une solution saline de chlorure de calcium que les techniciens du froid nomme la *saumure* ; le premier de ces réservoirs renferme l'anhydride sulfureux liquide, et une pompe aspire constamment le gaz qui s'en dégage pour le refouler, sous une pression de deux ou trois atmosphères, dans le second récipient où il se liquéfie par l'effet de cette compression : pour chaque kilogramme d'anhydride sulfureux qui passe d'un récipient dans l'autre, cent calories sont aspirées dans le premier bac et refoulées dans le second, puisque la liquéfaction dégage toute la chaleur que l'évaporation avait absorbée. Ainsi, le premier bac se refroidit, à mesure que l'évaporation continue, tandis que le second s'échauffe et le fonctionnement de la pompe transporte, non seulement du gaz sulfureux, mais aussi de la chaleur du réser-

voir déjà froid dans celui que les opérations précédentes ont commencé d'échauffer ; et rien n'empêche de continuer cette manœuvre indéfiniment, puisqu'on peut faire repasser le gaz liquéfié dans le premier réservoir, où il subit à nouveau l'évaporation.

Envisagée à ce point de vue, la machine frigorifique n'est qu'une machine à vapeur fonctionnant à l'envers : dans la machine à vapeur, il y a également un liquide, l'eau, qui s'évapore et qui se liquéfie à nouveau ; mais l'évaporation se fait de la chaudière vers le condenseur, c'est-à-dire de l'enceinte chaude vers l'enceinte froide ; en même temps, de la chaleur est transportée dans le même sens ; enfin, il y a *production* de travail mécanique. Tout ceci est juste le contraire de ce qui se passe dans la machine frigorifique où du travail mécanique est *consommé* pour transporter la chaleur, en même temps que son support matériel, du récipient froid au récipient chaud. Ce point de vue n'avait pas échappé au génie profond et pénétrant de Sadi-Carnot, un des fondateurs de la thermodynamique ; mais Carnot, qui vivait à une époque où le calorique était considéré comme un fluide, imaginait que la chute de température de ce fluide engendrait le travail mécanique de la machine à vapeur comme

la chute de niveau de l'eau dans un moulin fait tourner les roues et actionne les meules ; on peut dire, en continuant la même comparaison, que la machine frigorifique remonte la chaleur d'un réservoir froid à un réservoir chaud, en consommant le travail mécanique qui sert à actionner les pompes ; en fin de compte, comme il a fallu mettre en jeu une machine à vapeur pour obtenir ce travail mécanique, l'opération se solde par une consommation de charbon ; on a donc fait du froid en brûlant de la houille, ou, pour mieux dire, on s'est servi du travail résultant pour déplacer de la chaleur et pour la chasser des lieux qu'on veut réfrigérer.

Maintenant que ces principes sont bien établis, je ne m'attarderai pas à décrire en détail la machine frigorifique ; tout le monde a pu la voir fonctionner, car il n'est point de sous-préfecture qui ne possède sa fabrique de glace. La saumure, refroidie par l'évaporation du gaz liquéfié, atteint progressivement 5 à 10 degrés au-dessous de zéro, mais le sel dissous la préserve de la congélation ; c'est cette saumure liquide qui sert de courtier au froid engendré. Ainsi, dans la fabrique de glace, on se contente d'y plonger des moules métalliques remplis d'eau douce ; cette eau se congèle rapidement, si rapi-

dement même, que l'air dissous dans l'eau est emprisonné dans la glace avant d'avoir pu se dégager à l'extérieur : c'est aux nombreuses bulles de cet air que la glace artificielle doit son manque de transparence ; les glaces naturelles, au contraire, sont transparentes parce que la congélation s'est effectuée lentement et de proche en proche.

La fabrique de glace représente la solution rudimentaire du problème et la réfrigération ; c'est une sorte de mise en bouteille du froid qui peut ensuite circuler, se diviser en menus fragments et apporter en tous lieux une fraîcheur dont certains étés nous font apprécier le charme ; la glace fait partie de notre régime estival car, plus exigeants que les Espagnols ou les Portugais, nous ne nous contenterions pas de l'eau, médiocrement rafraîchie par sa propre évaporation, qu'on obtient à l'aide des alcarazas et des gargoulettes suspendues dans un courant d'air.

* * *

Si on veut voir, dans sa perfection achevée, l'organisme de production et d'utilisation du froid, il faut visiter un de ces *entrepôts frigori-*

fiques, qui s'établissent actuellement dans les grandes villes et dans les centres de production, de transformation ou de transit des matières alimentaires. Ces entrepôts sont composés d'un certain nombre de pièces, ayant chacune son affectation, car il n'est pas possible de conserver côte à côte des fruits, des viandes et des fourrures. Il faut maintenir partout une température légèrement supérieure à zéro, c'est-à-dire enlever toute la chaleur, à mesure qu'elle pénètre dans les différentes parties de l'entrepôt ; or cette chaleur rentre avec les nouvelles marchandises qu'on met en réserve, avec les portes qui s'ouvrent, avec les employés qui assurent la manipulation des marchandises ; surtout, elle filtre peu à peu à travers les parois du frigorifique ; mais cette rentrée, qui est la plus importante, est loin d'être invariable ; elle se modifie avec les saisons, voire même avec les heures ; un mur frappé par le soleil laisse passer plus de chaleur que lorsqu'il est à l'ombre. Si on veut, malgré l'irrégularité de ces rentrées de chaleur, maintenir une température fixe, il faut instituer un mécanisme régulateur analogue à celui qui, dans notre corps, répartit l'afflux sanguin de façon à régulariser la température. A ce point de vue, l'entrepôt frigorifique est un organisme

où la saumure refroidie joue le rôle du sang de notre corps, mais d'un sang qui refroidit au lieu de réchauffer. Saisie dans les bacs par des pompes qui forment le cœur de cet appareil circulatoire, elle est refoulée dans des artères de métal qui parcourent l'entrepôt et se subdivisent dans ses différentes salles ; elle retourne ensuite au bac réfrigérant d'où elle repart, refroidie à nouveau, pour un nouveau circuit. Or, il suffit de régler la vitesse d'écoulement de cette saumure pour régler, du même coup, la température ; ce résultat est assuré, avec un automatisme parfait, par les thermomètres placés dans chaque salle. La température vient-elle à s'élever au-dessus de la limite tolérée ? le déplacement du thermomètre ferme aussitôt un circuit électrique, et le courant actionnant un moteur ou un simple électro-aimant, ouvre plus largement les vannes qui commandent l'entrée des canalisations ; l'effet inverse se produit si la température a tendance à s'abaisser au-dessous de zéro ; ainsi, les machines se surveillent elles-mêmes, et on peut, si la chose est nécessaire, maintenir dans des chambres contiguës des températures différentes.

Il faut quelque chose de plus pour compléter l'entrepôt frigorifique ; il faut le munir d'un épi-

derme presque imperméable à la chaleur, afin de réduire au minimum la dépense de refroidissement, qui forme la plus lourde charge de son entretien. Les physiciens utilisent, dans leurs expériences, des récipients à paroi presque imperméable, imaginés par Dewar et d'Arsonval ; ils sont formés par deux vases en verre, enfermés l'un dans l'autre et laissant entre eux un étroit intervalle d'où l'air a été soigneusement enlevé ; ainsi la chaleur, pour pénétrer à l'intérieur est forcée de traverser un espace vide de toute matière ; or le vide est, de tous les milieux, le moins conducteur, et l'emploi de ces vases à double paroi permet de réaliser l'isolement thermique idéal ; c'est grâce à eux que l'air liquide peut être conservé et manipulé en dehors des enceintes refroidies où il se prépare ; mais la principale, ou pour mieux dire, la seule application, de ces récipients en dehors du laboratoire est constituée par les bouteilles « Thermos », où la fragilité du verre est rachetée par une enveloppe protectrice, qui servent aux excursionnistes à emporter boissons chaudes ou sirops glacés.

Mais cette solution élégante reste, jusqu'à nouvel ordre, interdite à la grande industrie ; celle-ci n'a d'autre ressource que de recourir

aux corps mauvais conducteurs, ou « calorifuges », comme on dit en langage technique : tels sont le charbon et la sciure de bois, la tourbe et surtout le liège ; on constitue avec les déchets de liège des plaques d'agglomérés qui donnent les meilleurs résultats ; mais, quel que soit le calorifuge employé, il ne remplit sa tâche protectrice que s'il reste parfaitement sec ; aussi prend-on soin de placer cet isolant entre deux murs de briques, ou encore de le protéger par des parois de béton ou de ciment armé contre tout ce qui pourrait lui apporter de l'humidité.

Tous ces revêtements calorifuges ont un caractère commun : ils sont très légers, et cette remarque nous montre qu'ils isolent tous de la même manière, en immobilisant l'air qu'ils renferment et qui constitue la presque totalité de leur volume. Si les gaz, et l'air comme les autres, transportent aisément la chaleur lorsqu'ils sont en mouvement, en revanche, lorsqu'on les force à rester immobiles, ils sont, après le vide, les meilleurs isolants qu'on connaisse. Or, regardons au microscope un morceau de liège ; nous le verrons constitué de cellules desséchées, aux parois très minces, et remplies d'air ; c'est en emprisonnant cet air, en s'opposant à ses mouvements de convection,

que le liège et tous les corps poreux agissent comme isolants thermiques ; on comprend qu'ils cesseraient de remplir ce rôle si leurs pores étaient remplis d'eau.

Notre expérience personnelle étend et confirme ces résultats ; les vêtements et les fourrures qui nous protègent contre le froid sont formés de poils et de filaments fins, qui forcent l'air à rester immobile ; le duvet léger que nous dérobons aux eiders, et même aux simples canards, pour faire nos édredons n'agit pas différemment. Le grand physicien Fourier, qui appliquait, il y a un siècle, la puissance de son génie à l'étude de la conductibilité, connaissait fort bien ces propriétés isolantes de l'air en repos ; on raconte qu'il s'était fait fabriquer une douzaine de manteaux, dont chacun était fait d'une étoffe très légère ; suivant l'état du temps, il en superposait un nombre variable, et il affirmait pouvoir se garantir ainsi contre les froids les plus intenses, tout en évitant la charge, si pénible en hiver, de lourds vêtements.

Mais quittons ces considérations théoriques ; ce qui intéresse les ingénieurs « frigoristes », c'est moins de savoir pourquoi le liège isole que comment il isole, afin de pouvoir calculer leurs installations, c'est-à-dire proportionner la puis-

sance des machines frigorifiques au développement de l'entrepôt ; or, on connaît la conductibilité des divers isolants, c'est-à-dire le nombre qui mesure ce que chacun d'eux laisse passer de chaleur, dans des conditions déterminées ; avec ces nombres, l'ingénieur peut calculer approximativement la chaleur qui rentre, en moyenne, pendant une heure ; c'est cette rentrée horaire de calorique que les machines doivent rejeter au dehors ; c'est elle qui mesure la *puissance* des appareils frigorifiques à installer ; cette puissance devrait donc s'évaluer en calories par heure, mais les frigoristes ont leurs petites manies ; où les autres parlent de chaleur, ils parlent de froid ; une calorie qui s'en va s'appelle pour eux une *frigorie :* en admettant cette manière de parler, une usine frigorifique d'une puissance de cinquante mille frigories sera capable d'enlever cinquante mille calories par heure aux installations qu'elle dessert, ou, si on aime mieux, de créer ce même nombre de frigories dans le même temps.

Le calcul d'une installation frigorifique n'est pas une grosse affaire ; ce qui est plus délicat, c'est cet ensemble de précautions, qui ne se calculent pas, mais qui se traduisent par un bon rendement de l'organisme créé ; aujourd'hui,

tous les cas pratiques ont été résolus, toutes les bévues ont été faites et réparées, et l'industrie frigorifique est sûre d'elle-même ; c'est ainsi que les ingénieurs ont appris, à leurs dépens, l'importance d'une méticuleuse propreté : lors de la première installation frigorifique de la Bourse de Commerce, à Paris, on s'était contenté d'établir un lit de liège granulé entre deux parois de bois ; ce dispositif, sans inconvénient pour les produits congelés, s'est trouvé détestable pour les viandes réfrigérées ; le sang et les divers produits organiques, s'infiltrant à travers les boiseries, pénétraient peu à peu à l'intérieur, déterminant la putréfaction du bois et engendrant une saleté mal odorante qui imprégnait tout dans l'entrepôt. On se garderait bien, aujourd'hui, de retomber dans cette erreur ; il suffit de comparer l'aspect repoussant des abattoirs, des échaudoirs et des locaux infects où sont manipulées, dans les petites villes, les denrées alimentaires, avec la minutieuse propreté des installations frigorifiques modernes, pour saisir toute l'importance du progrès accompli ; spécialement en ce qui concerne les viandes, la « chirurgie alimentaire » s'entoure de toutes les précautions exigées par l'hygiène ; ainsi, l'industrie frigorifique a été le prétexte et l'occasion d'une transforma-

tion radicale, et il faut espérer que, dans quelques années, les immondes échopes où se triturent et se conservent, avec la collaboration du soleil, de la poussière et des mouches, toutes nos matières alimentaires, nous paraîtront bonnes à fournir la cuisine des Indiens Botocudos.

J'ai décrit avec quelque détail l'entrepôt frigorifique, parce qu'il représente le type le plus achevé des applications du froid ; établi dans les grandes villes, dans les centres de production, il constitue le grand régulateur, le « volant » de la consommation. Mais il ne suffit pas et une installation complète comprend un réseau frigorifique qui relie les divers entrepôts, car telle est la fragilité de l'aliment, fruits ou lait, viande ou poisson, que le froid doit l'accompagner jusqu'à la bouche du consommateur. En dehors des grands navires frigorifiques qui parcourent les océans, le transport se fait par des trains frigorifiques, ou par wagons réfrigérés ; sur ce point, la diversité des solutions employées, montre que la doctrine frigoriste n'est pas encore arrêtée, ni la période d'essais complètement close.

Le procédé le plus simple, essayé dès 1867 en

Amérique, consiste dans l'emploi des wagons à glace : le plafond du wagon porte des caissons remplis de glace, dont la fusion refroidit l'air qui circule à travers les matières convoyées ; parfois même, lorsqu'un refroidissement plus intense est requis, une solution saline s'écoule en mince filet sur cette glace et donne une saumure froide qui circule dans des serpentins à l'intérieur du wagon.

Une deuxième solution consiste à transformer chaque wagon en une petite usine frigorifique, au moyen d'une machine réfrigérante mue par l'essieu du wagon ; une puissance de deux chevaux suffit pour assurer la réfrigération, quelle que soit la durée du parcours ; l'inconvénient du système est de ne pas fonctionner pendant les arrêts, mais ceux-ci sont toujours réduits au minimum, car il y a accord parfait entre l'intérêt des commerçants, qui ont toujours hâte de prendre livraison des marchandises et celui des compagnies de transports, qui évitent d'immobiliser des wagons coûteux, et dont elles n'ont jamais assez, surtout lors du plein de la production.

Enfin, une dernière solution, fort employée en Amérique, est la *préréfrigération :* les wagons, aux parois parfaitement isolantes, sont

chargés, puis introduits dans une dépendance de l'installation frigorifique, sorte de « gare du froid » où le train est « frappé » : des manches mobiles, qui s'adaptent aux wagons, y injectent de l'air froid jusqu'à ce que toute la masse, contenant et contenu, soit amenée au voisinage de zéro; puis, les panneaux mobiles sont refermés et clos hermétiquement et le train est lancé vers sa destination; il peut rouler ainsi pendant plusieurs jours, sans que la température ait remonté à un degré dangereux, et ce procédé, qui passe pour fort économique, paraît suffisant dans la plupart des cas.

La création de cet arsenal frigorifique s'est faite sans tapage ni réclame; elle apparaît pourtant comme l'œuvre sociale la plus efficace de notre époque; la France, depuis Tellier, ne peut guère se vanter d'avoir joué un grand rôle dans ce progrès, mais il ne faut pas en accuser seulement l'esprit routinier qui caractérise notre peuple, pourtant si hardi en paroles. En réalité, les conditions étaient, chez nous, peu favorables à l'extension de l'industrie frigorifique; la France est un petit pays (je parle, bien entendu, de la superficie territoriale), qui se suffit à peu près à lui-même, et que le régime protectionniste condamne à ne consommer que les produits

nationaux ; par suite, les circonstances y étaient moins favorables au développement des transports alimentaires qu'en Amérique et en Angleterre. L'Angleterre va au marché dans tout l'univers ; elle possède une nombreuse flotte de steamers frigorifiques qui vont chercher pour elle les viandes, le lait, le beurre, les produits de la pêche, les fruits partout où ces denrées sont abondantes et à bon compte ; elle a organisé, chez elle, la vie économique et c'est pour cela qu'on trouve, sur les marchés de Londres, de la viande de bœuf, parfaitement saine, à un franc le kilog et qu'on y peut acheter une douzaine de bananes pour trente centimes.

Aux États-Unis, les effets sont les mêmes, avec des causes un peu différentes ; l'industrie de la viande s'est concentrée dans certaines villes, comme Chicago et Saint-Louis, et cela exige d'immenses entrepôts frigorifiques où les animaux abattus et découpés sont, instantanément, saisis par le froid, en attendant d'être transformés en produits marchands, saindoux, jambons, « corned beef », qui sont ensuite déversés sur tout l'univers. Mais, ce qui a surtout déterminé l'extension des transports frigorifiques, c'est l'énorme distance qui sépare les États peuplés et, par suite, grands consommateurs, de l'est,

des États du nord et de l'ouest, qui produisent en abondance les primeurs, les légumes et les fruits ; le Texas et la Floride donnent les produits tropicaux, ou les reçoivent de Cuba, des Antilles ou de l'Amérique centrale ; la Californie est devenue, de son côté, le superbe et gigantesque verger des États-Unis ; des denrées délicates doivent faire six à dix jours de trajet avant d'arriver à destination ; et c'est pour cela qu'on voit, dans les grands centres producteurs de Californie, des stations de préréfrigération où pommes, pêches, raisins, oranges sont, au cueillir de l'arbre, congelés avant de partir pour New-York ou Philadelphie, que les cerises de l'Orégon arrivent, parfaitement saines, jusqu'à Boston, à 3.000 milles de leur point d'origine, que les cantaloups de l'Arkansas et de la Californie se trouvent sur toutes les tables bourgeoises de Washington et de Baltimore, que les framboises du Puget Sound sont expédiées à Saint-Paul et à Minneapolis et que les tomates de la Floride atteignent les marchés du Canada ; on se rend compte de l'énorme trafic qu'exige l'alimentation d'un aussi grand peuple, et on s'explique que les compagnies américaines disposent de 80.000 wagons frigorifiques, alors que la France en possède tout juste quelques centaines.

N'avons-nous, en France, qu'à regarder et à nous croiser les bras? Certains ne l'ont pas pensé ; ils se sont dit que, dans l'état actuel et sans escompter un retour problématique aux doctrines libre-échangistes, il y avait place chez nous pour un large développement des applications frigorifiques : c'est pour y aider, pour prêcher la bonne doctrine, pour soutenir les initiatives, qu'ils ont fondé l' « Association française du froid » ; le congrès qui a tenu ses assises à Toulouse, en 1912, a continué l'œuvre féconde des congrès de Paris et de Lyon ; il a permis aux spécialistes d'échanger leur expérience, de se mettre d'accord sur certains points d'ordre technique ; surtout, il a contribué à l'éducation publique, en montrant ce qu'on peut faire utilement dans notre pays.

Dès à présent, l'installation d'entrepôts frigorifiques dans toutes les villes est assurée de faire des bénéfices, soit que l'exploitant se contente de « louer du froid », c'est-à-dire de mettre des emplacements à la disposition de ceux qui ont quelque chose à conserver, soit qu'il opère pour son propre compte, achetant les denrées saisonnières pour les revendre ensuite à des cours plus élevés. Le mouvement est donné et la propagande n'a plus qu'à l'accélérer ; nombre de

syndicats fondent des entrepôts frigorifiques à l'usage exclusif de leurs adhérents ; bouchers et charcutiers, surtout, se lancent hardiment dans cette voie, ayant appris à leurs dépens l'importance des déchets produits par la corruption, et compris qu'un commerçant avisé doit acheter chaque chose en son temps pour pouvoir la vendre en tout temps.

Mais les transports frigorifiques méritent, eux aussi, d'être organisés méthodiquement; il suffit de voir passer les trains de primeurs que l'Algérie et le Midi expédient vers les marchés du Nord, pour se rendre compte que notre pays est appelé à devenir, pourvu qu'il y prenne peine, le verger et le potager de l'Angleterre et de l'Allemagne. Dans le plein de la saison, les fraises du Vaucluse et des Bouches-du-Rhône font, en moyenne, 40 wagons par jour, les cerises du Var, 15 à 20 wagons, les artichauts de Perpignan, d'Hyères et de Cavaillon, 10 à 12 wagons, les choux-fleurs d'Angers et d'Avranches, 50 wagons ; quant aux raisins et aux tomates, c'est par trains entiers qu'ils vont trouver, dans le Nord, une clientèle illimitée.

Pour les transports de poisson et de viande, la même conclusion s'impose : le procédé archaïque de transport des bestiaux sur pied ne livre

aux abattoirs des grandes villes que des animaux fatigués, et souvent malades : on compte, aux abattoirs de la Villette, que, sur trois cents tonnes de viande saisies annuellement comme impropres à la consommation, les deux tiers ont été avariés en cours de route ; combien plus sain, et plus économique en même temps, serait l'abatage sur place, suivi du transport par wagons réfrigérés ! Il en va de même des produits de la mer ; nos procédés sommaires d'expédition permettent tout juste à la « marée » de Boulogne et de Dieppe d'atteindre Paris par des trains rapides, alors que, grâce aux convois frigorifiés, Bâle est devenu le grand marché de poissons de l'Europe centrale.

Je m'en voudrais de multiplier les exemples ; mais je dois, pour finir, faire ressortir un des aspects les plus importants de la question, important comme tout ce qui touche à la sécurité nationale et à la défense du sol, trop convoité, de notre patrie. En temps de guerre, il faut faire vivre les armées, et la tâche est difficile, autant qu'essentielle, avec les énormes masses humaines que les combinaisons de la guerre déplacent à chaque instant ; le temps n'est plus où les troupes vivaient sur le pays, et emportaient leurs vivres dans des sacs lourdement

chargés. Il faut donc prévoir, pour le cas de guerre, d'énormes approvisionnements et des moyens spéciaux de transport; on comprend le rôle que les installations frigorifiques sont appelées à jouer : les entrepôts, répartis sur la surface du territoire, constituent, principalement pour la viande, les réserves indispensables, ces « munitions du ventre » avec lesquelles on gagne les batailles. A ce point de vue, l'Allemagne est prête ; elle possède actuellement, dans ses quatre cents stations frigorifiques, les réserves de viande nécessaires pour alimenter son armée pendant six mois.

Ce n'est pas tout d'avoir des provisions ; il faut pouvoir les transporter; or l'emploi des wagons réfrigérés simplifie singulièrement la tâche, en allégeant le transport de tout ce qui n'est pas utilisable ; le service français de l'intendance prévoit dix jours de viande derrière les troupes en marche ; or, pour quatre corps d'armée, cette masse alimentaire remplit 240 wagons lorsqu'elle est représentée par du bétail sur pied, tandis que 40 wagons suffisent lorsqu'ils transportent de la viande congelée.

La conclusion s'impose, et notre intendance a mis la question au premier rang de ses préoccupations. Il ne faut pas penser qu'aux aéro-

planes ; le sort des peuples se réglera, longtemps encore, sur terre, et nous devons nous souvenir que l'héroïsme des combattants procède souvent d'un estomac satisfait. Voilà pourquoi notre organisation frigorifique importe à tous ceux qui veulent leur pays prospère dans la paix et fort dans la guerre.

L'ALIMENT CHIMIQUE

CONDIMENTS ET PARFUMS

L'ALIMENT CHIMIQUE

CONDIMENTS ET PARFUMS

Il n'y a qu'un cri pour déplorer la cherté croissante de la vie ; les objets de première nécessité, et surtout les denrées alimentaires, atteignent des prix de famine. On accuse les mauvaises récoltes causées par la sécheresse ; l'humidité vient et les prix montent encore. Cette progression a-t-elle pour cause, comme les économistes le prétendent, la surproduction de l'or, grâce à quoi la pièce de vingt francs ne vaut plus que cent sous ? C'est bien possible, mais ce qui est certain, c'est que les ménagères éprouvent chaque jour plus de peine à résoudre le problème qui préoccupait jadis Harpagon : faire bien manger pour peu d'argent.

Il est grand temps que la chimie vienne à notre aide en fabriquant de toutes pièces, dans ses cornues, l'aliment économique qui remplacera, dit-on, pour les générations futures, le

pain, le beurre et la viande. Berthelot nous avait déjà promis cet âge d'or dans une de ces fantaisies où le grand homme aimait à délasser son esprit; sa promesse, il est vrai, n'était que pour l'an 2000. Après avoir montré comment la science de l'avenir saurait utiliser toutes les énergies naturelles, il continuait en disant :

« C'est là que nous trouverons la solution économique du plus grand problème, peut-être, qui relève de la chimie, celui de la fabrication des produits alimentaires. En principe, il est déjà résolu : la synthèse des graisses et des huiles est réalisée depuis quarante ans, celle des sucres s'accomplit de nos jours et la synthèse des corps azotés n'est pas loin de nous. Ainsi le problème des aliments, ne l'oublions pas, est un problème chimique. Le jour où l'énergie sera obtenue économiquement, on ne tardera guère à fabriquer des aliments de toutes pièces, avec le carbone emprunté à l'acide carbonique, avec l'hydrogène pris à l'eau, avec l'azote et l'oxygène tirés de l'atmosphère.

« ... Un jour viendra où chacun emportera pour se nourrir sa petite tablette azotée, sa petite motte de matière grasse, son paquet de fécule ou de sucre, son petit flacon d'épices aromatiques accommodées à son goût personnel, tout cela

fabriqué économiquement et en quantités inépuisables par nos usines ; tout cela indépendant des saisons irrégulières, de la pluie ou de la sécheresse, de la chaleur qui dessèche les plantes ou de la gelée qui détruit l'espoir de la fructification ; tout cela enfin exempt de ces microbes pathogènes, origine des épidémies et ennemis de la vie humaine. Ce jour-là, la chimie aura accompli dans le monde une révolution radicale dont personne ne peut calculer la portée ; il n'y aura plus ni champs couverts de vignobles, ni prairies remplies de bestiaux. L'homme gagnera en douceur et en moralité parce qu'il cessera de vivre par le carnage et la destruction des créatures vivantes...

« Si la surface terrestre cesse d'être utilisée comme aujourd'hui, et disons-le tout bas, défigurée par les travaux géométriques de l'agriculteur, elle se recouvrira alors de verdure, de bois, de fleurs. La terre deviendra un vaste jardin arrosé par l'effusion des eaux souterraines et où la race humaine vivra dans l'abondance et dans la joie du légendaire âge d'or... pourvu que l'on réussisse à découvrir une chimie spirituelle qui change la nature de l'homme aussi profondément que notre chimie transforme la nature matérielle ! »

Malgré tous les efforts des chimistes, nous sommes encore loin de ces temps idylliques. Il est certain que le problème de l'aliment chimique est loin d'être utopique ; chaque jour voit sortir des cornues des produits nouveaux ; tout récemment, M. Daniel Berthelot, fils du grand homme et lui-même savant fort distingué, arrivait à réaliser, grâce à l'énergie de la lumière ultra-violette, des combinaisons qui ne se formaient jusqu'ici que dans les tissus vivants, sous l'action de la chlorophylle; rien ne s'oppose donc à ce qu'on reproduise des combinaisons alimentaires dont les éléments se trouvent dans l'air, l'eau et le charbon. Mais en attendant la pomme de terre de synthèse, ou même la fameuse tablette azotée, il nous faut toujours aller au marché. La chimie nous donne en abondance des explosifs, des poisons, voire même des médicaments, en un mot tout ce qui est nécessaire pour mourir ; il lui reste à trouver de quoi nous faire vivre.

Pourtant, ne soyons pas trop sévères ; elle nous offre déjà le superflu, c'est-à-dire le flacon d'épices dont parle Berthelot, sous forme de condiments et de parfums ; nous pourrions nous estimer satisfaits si ces produits étaient toujours loyaux et marchands au même titre que les pro-

duits naturels qu'ils aspirent à remplacer ; mais il faut avouer que notre goût et notre odorat sont des sens embryonnaires, qu'on satisfait à bon compte, alors que l'estomac proteste obstinément contre cette substitution. Quand un pâtissier peu scrupuleux donne à ses produits le goût de l'amande avec « l'essence de mirbane », qui n'est en réalité que de la nitrobenzine, il use d'un produit éminemment nocif et il est fort heureux qu'il n'en faille, pour parfumer, qu'une dose infinitésimale; mais je veux croire qu'il n'y a point de pâtissier sans scrupules. De même, la fameuse saccharine, qui donne au palais des diabétiques l'illusion du sucre, est si peu un aliment qu'elle traverse l'organisme sans décomposition ; du moins est-elle à peu près inoffensive, mais il faut une surveillance étroite pour qu'elle ne donne pas naissance aux fraudes les plus éhontées.

On peut donc affirmer que la chimie nous trompe lorsqu'elle nous apporte, à la place des parfums ou des condiments naturels, des produits dont la composition est toute différente et qui n'ont de commun avec eux que l'odeur ou le goût. Ainsi le musc synthétique, qu'on appelle le musc Baur, du nom de son inventeur, est, au point de vue chimique, du « trinitrobutyle-to-

luène », et son odeur seule le rapproche du musc naturel ; encore cette analogie n'existe-t-elle que pour les narines humaines, car les chats, qui recherchent l'odeur du musc naturel, s'écartent avec dégoût du musc Baur. Toujours est-il que, grâce à la chimie, il nous est loisible de sentir bon à bas prix, si c'est sentir bon que de sentir le musc. Le produit naturel qui provient, comme on sait, des sécrétions d'un chevrotain d'Asie, ne vaut pas moins de 1.800 francs le kilo, en dépit de son humble origine, tandis que son succédané artificiel se vend 70 francs. On pourrait croire, d'après le rapport de ces deux prix, que le chevrotain n'a plus qu'à se retirer d'une lutte inégale et à céder la place au produit chimique. Mais les choses ne se passent pas ainsi, parce que les produits naturels ont une finesse d'arome qu'on ne trouve jamais dans leurs succédanés : ceux-ci sont des produits purs, leur action sur les papilles olfactives ou gustatives est brutale, tandis que les essences distillées par les cellules vivantes ont toute la complexité de la vie d'où elles dérivent. La chimie sait faire de l'alcool, c'est même une de ses plus brillantes synthèses, mais elle ne fera jamais de la fine champagne ; ces innombrables éthers, aux proportions variées, qui font la finesse et le

bouquet de nos grands crus, la nature seule est capable de les élaborer et de les doser dans les grappes de la vigne, et encore n'y réussit-elle pas partout et toujours. En supposant que les chimistes fabriquent l'alcool à vil prix, croit-on qu'il en résulterait une baisse de prix de nos armagnacs ? Pareille chose arrive pour tous les produits du laboratoire ; ils s'adressent à une clientèle peu difficile et lui distribuent, à bas prix, des parfums violents et économiques ; quant aux aromes délicats des fleurs, ils restent toujours d'un prix bien plus élevé, comme si ces deux produits n'avaient rien de commun et poursuivaient leur carrière en toute indépendance.

Un exemple topique est celui de la vanille. C'est en 1874 que les chimistes allemands Tiemann et Haarmann parvinrent à préparer la vanilline. Ce corps n'est pas, comme le musc artificiel, une vague contrefaçon, bonne tout au plus à tromper le goût ou l'odorat de dégustateurs peu exercés, mais le produit même que la nature élabore et accumule dans les gousses de vanille ; d'ailleurs, la chimie, pour faire une œuvre si belle et si parfaite n'a pas pu opérer seule ; elle a agi de compte à demi avec la nature ; c'est en partant d'un produit naturel, l'essence de girofle, et en la soumettant au labora-

toire à d'habiles transformations, qu'on est parvenu à obtenir la vanilline ; ainsi le chimiste opère comme l'architecte qui transforme une vieille bâtisse en une somptueuse maison, sans toucher aux murs maîtres et en se bornant à modifier l'aménagement intérieur ; l'opération n'est intéressante, au point de vue économique, que si on part d'un édifice sans valeur, c'est-à-dire d'un produit à bon marché, pour en tirer un corps dont le prix soit élevé. Ainsi, par addition d'intelligence, on peut centupler la valeur d'un produit naturel ; les chimistes allemands ont excellé et excellent encore dans ces transformations ; ils ont réalisé des merveilles, et je dois dire, en toute impartialité, que je ne connais rien de plus beau, dans la science, que l'effort méthodique et discipliné qui leur a acquis la maîtrise dans une science où d'autres nations, entre autres la France, eussent pu prétendre à la première place.

Voici donc la vanilline artificielle préparée en grand dans les usines et lancée dans le commerce ; son prix de début atteint 1.800 francs le kilogramme, mais la puissance du nouveau produit est telle que, même à ce prix, il y a encore grand avantage à l'employer. Je laisse à penser, dès lors, avec quoi on va parfumer crèmes et

chocolats ; la chose est sans inconvénient, puisque le produit chimique est identique à l'extrait purifié de la vanille, et la bourse du consommateur est satisfaite sans que son estomac ait lieu de protester. Actuellement, les perfectionnements successifs de la fabrication ont abaissé le prix de la vanilline artificielle au voisinage de 45 francs le kilogramme : à ce compte, le produit naturel aurait dû disparaître depuis longtemps, comme la garance a disparu devant l'alizarine. Or, c'est exactement le contraire qui est arrivé : la culture de la vanille a pris un tel essor que l'exportation des colonies françaises, qui n'atteignait pas vingt mille kilogrammes en 1880, dépasse aujourd'hui deux cent mille ; ceci prouve qu'il y a place, dans le vaste Univers, pour le produit naturel et pour son succédané chimique, plus économique, mais moins savoureux. Les gousses de Tahiti, par exemple, possèdent une inimitable odeur d'héliotrope. Ainsi, la vanille naturelle reste le parfum ou le condiment du riche parce qu'elle renferme, en plus du produit principal que le laboratoire sait reproduire, une foule d'autres essences qui donnent à son arome une finesse et un velouté incomparables. Ceci n'est qu'un exemple pris au hasard entre cent autres : la véritable essence de violettes vaut

2.000 francs le kilogramme, et ce prix n'a pas baissé, bien qu'on prépare un produit chimique, l'ionone, qui a presque exactement la même odeur et qui coûte quatre fois moins ; l'essence de roses, dont une goutte suffit à fabriquer plusieurs litres de parfums, coûte 2.500 francs le kilogramme, et ce prix ne paraît pas exorbitant si on considère qu'il faut 10.000 kilogrammes de pétales et des soins minutieux pour obtenir ce kilogramme d'essence ; mais la chimie s'est faite la parfumeuse du pauvre, en aidant la nature à donner des succédanés dont le prix est plus abordable ; telle est l'essence de géranium, qui vaut 25 francs le kilo. Depuis qu'on a constaté cette similitude d'aromes, la culture du géranium a pris, surtout en Algérie et sur la Côte-d'Azur, un développement extraordinaire, puisqu'on estime à plusieurs millions le chiffre d'affaires qu'elle détermine. Cette essence peut elle-même être dérivée, par une opération chimique simple, de l'essence de citronnelle de Ceylan, dont le kilogramme ne revient qu'à 6 francs.

Tout ceci est fort bien et je veux que le pauvre puisse, comme le riche, parfumer son mouchoir ; mais la médaille a son revers et la chimie n'est pas moins complaisante à ceux qui adultèrent sans vergogne nos produits alimen-

taires. Veulent-ils donner aux bonbons anglais le goût de banane ? Quelques gouttes d'acétate d'amyle suffiront pour plusieurs kilogrammes de sucre. Cherchent-ils à transformer de l'alcool de betteraves en vieux rhum de la Martinique ? Il n'y faut qu'un peu de formiate d'éthyle et une belle étiquette. Ils imitent, dans les sucreries ou les confitures, le goût de l'ananas avec le butyrate d'éthyle et celui de la pomme reinette avec le butyrate d'amyle. Tout cela est pratique, commode et économique ; mais il se trouve des esprits rétrogrades pour estimer que cette discrète cuisine chimique ne sera véritablement un progrès que lorsque la science saura, par je ne sais quelle galvanoplastie, recouvrir nos estomacs d'une doublure qui leur permette d'absorber ces produits sans dommage.

Ainsi la science nous donne, pêle-mêle, le bon et le mauvais ; à voir sortir des cornues et des alambics toutes ces essences rares que les plantes ne distillent qu'à regret, on s'étonne que la chimie, si généreuse pour nous offrir le superflu, n'ait pas réussi à nous procurer le nécessaire. Pourtant, ceci n'a rien que de logique. Plus l'être vivant se perfectionne, plus l'aliment qu'il exige se complique ; les lichens se nourrissent

d'air, d'eau et de cailloux ; certaines plantes peuvent vivre et prospérer dans un milieu formé exclusivement de sels minéraux ; c'est ainsi que le chimiste Raulin, qui fut un des élèves favoris de Pasteur, savait élever des champignons dans un milieu chimique dont il avait donné la formule. Les animaux simples, comme les éponges, les oursins, ne paraissent pas bien difficiles pour leur nourriture ; les herbivores se contentent des produits élaborés dans les tissus végétaux, tandis que les carnivores consomment des substances encore plus complexes ; enfin, l'homme lui-même paraît avoir d'autant plus d'exigences qu'il est plus élevé en civilisation : « Dis-moi ce que tu manges, et je te dirai ce que tu es », proclamait jadis Brillat-Savarin ; cette formule n'est pas pour déplaire aux gourmets dont elle justifie le défaut en y voyant un indice de supériorité. En fait, nos aliments sont les produits les plus compliqués de l'univers ; une molécule d'albumine ou de jaune d'œuf est un monde qui contient des milliers d'atomes, unis par des liens d'une extraordinaire complexité ; or, la chimie était et est encore une science trop brutale ; les moyens violents qu'elle met en œuvre ne lui permettent pas d'assembler ces édifices fragiles et compliqués ; elle ressemble un peu à ce géant qui,

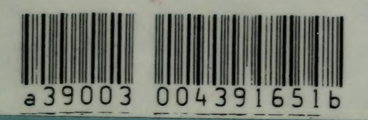
de ses mains rudes et malhabiles, s'essayait à dresser des châteaux de cartes. La synthèse de l'aliment exige moins de force que d'habileté ; elle requiert l'emploi d'agents délicats que la nature seule sait jusqu'ici mettre en œuvre : les caresses d'un air tiède, la chaleur pénétrante des rayons solaires, associés à tous les sucs de la terre.

Mais la chimie se transforme. De même qu'Hercule apprit à manier la quenouille après la massue, elle s'exerce à employer les forces persuasives et à construire des édifices de plus en plus compliqués. Elle a commencé par le plus simple en abordant la synthèse des essences et des parfums ; ces produits ne sont en réalité que des déchets de la matière vivante, c'est-à-dire des décombres d'édifices plus compliqués. C'est pour cette raison que leur synthèse devait, dans l'ordre logique du progrès, se présenter la première. Il n'y a pas de veto qui impose des limites à la science, et les progrès que Berthelot prophétisait il y a dix-huit ans s'accomplissent sans défaillance, bien que trop lentement au gré de notre impatience. Les admirables travaux de Fischer montrent que la synthèse des sucres n'est pas éloignée : il faut nous attendre à croquer, un jour ou l'autre, des bonbons chimiques. Puis

viendra la préparation des matières féculentes et amylacées; on nous offrira, sous des dénominations engageantes et avec un aspect appétissant, des pâtes tirées de la sciure de bois, de la paille ou des vieux chiffons ; notre estomac protestera peut-être un peu au début, mais ce sera si bien présenté, si délicatement aromatisé, qu'on finira par s'y laisser prendre. Puis viendra le tour des produits azotés qui constituent la quintessence de l'aliment. Le cochon, cet éternel sacrifié, pourra connaître alors le bonheur de vieillir, s'il ne s'ennuie pas dans un univers hygiénique et aseptique... Mais nous, qui nous rendra le bouquet des vieux vins ou la chair exquise des fraises ?

TABLE DES MATIÈRES

ÉVREUX, IMPRIMERIE CH. HÉRISSEY, PAUL HÉRISSEY, SUCC


a39003 004391651b


U D' / OF OTTAWA
COLL ROW MODULE SHELF BOX POS C
333 14 05 03 14 09 1